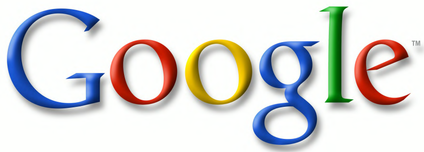
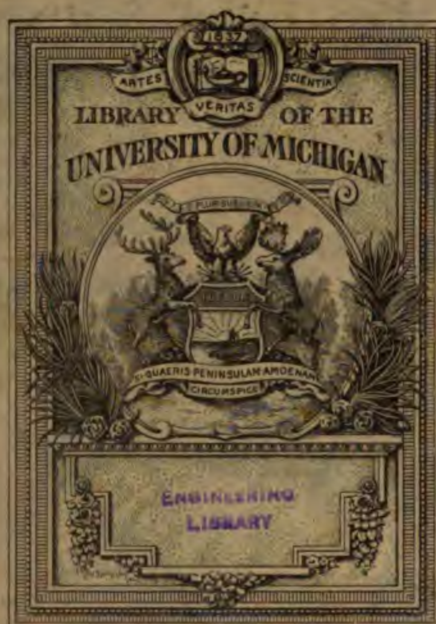
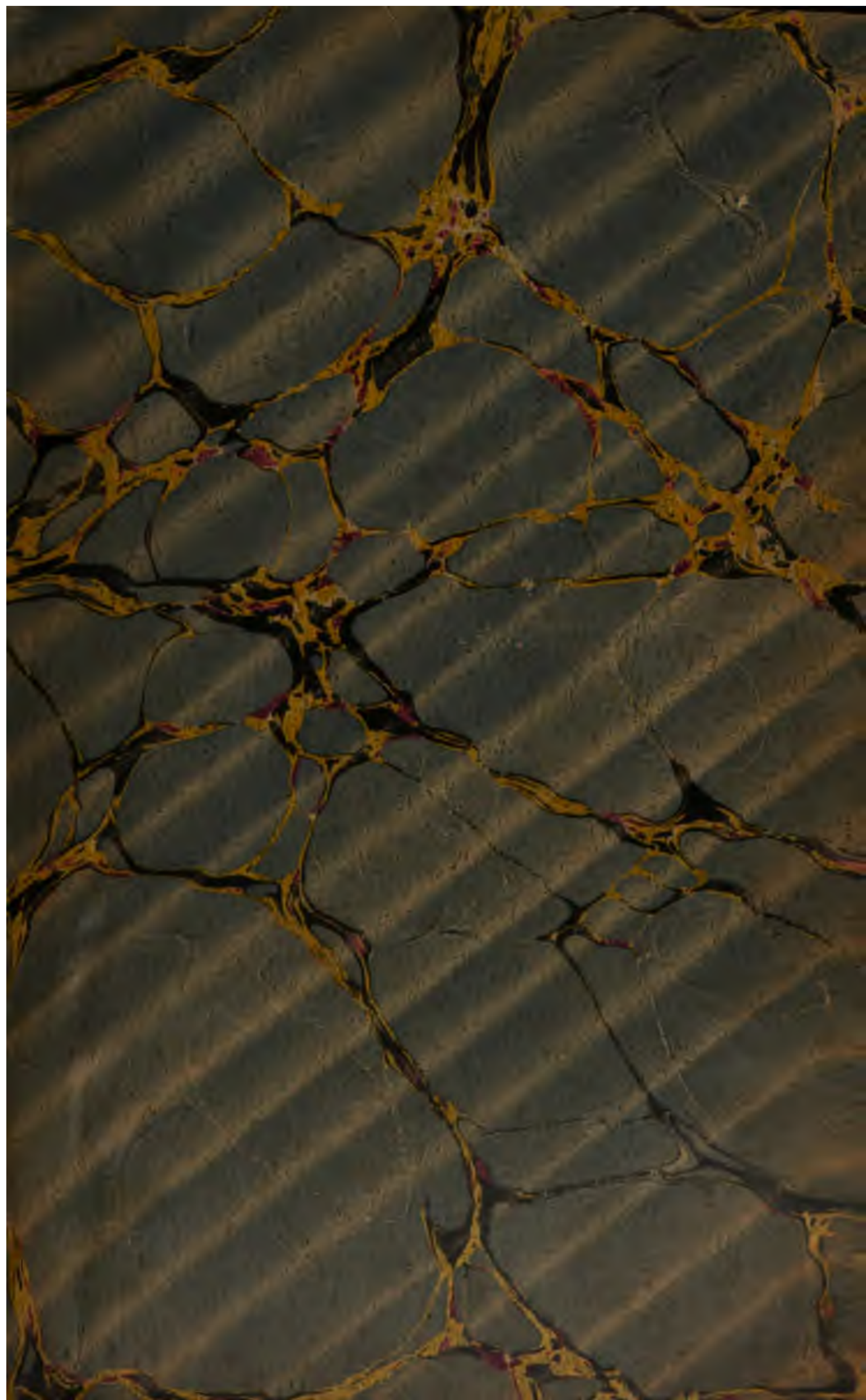



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE



ANNALES

DES

PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

6e SÉRIE

TOME XIV

1887

2e SEMESTRE



EXTRAIT DU CAHIER DES CHARGES

DE L'ÉDITEUR DES ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES

(Période 1881-1900).

Conditions stipulées au profit des auteurs :

Vingt-cinq exemplaires seront remis à chacun des auteurs des mémoires publiés.

. . . .

Mme Dunod devra exécuter, pour le compte des auteurs qui en auront fait la demande au moment même où ils enverront leurs manuscrits à l'administration, et sur l'avis qui lui en sera donné, des tirages à part de leurs mémoires aux prix suivants :

1° Par *feuille de texte* et pour le premier cent d'exemplaires, 10 francs ; pour chaque centaine en plus, 5 francs ;

2° Par *planche* et par cent exemplaires, 10 francs ;

3° Pour *brochage, couverture et faux frais :* pour une feuille de texte seule, 2 fr. 50 ; pour chaque feuille supplémentaire et chaque planche, 25 centimes ;

4° Pour un *titre spécial imprimé*, 10 francs.

Les auteurs qui ne pourraient s'entendre avec Mme Dunod pour la publication et la vente de leurs mémoires extraits des *Annales* qu'ils voudraient publier séparément pourront, avec l'autorisation de l'administration, traiter avec tout autre éditeur et, dans ce cas, les planches et les bois des *Annales* pourront leur être prêtés pour les tirages qu'ils auront à faire ; mais la mise en vente de leurs mémoires ne pourra avoir lieu qu'un an au moins après la publication de la dernière des livraisons des *Annales* auxquelles ils auront été empruntés.

AVIS IMPORTANT

La Commission des *Annales* rappelle qu'elle n'est en aucune façon responsable des opinions émises et des théories développées par les auteurs, et qu'elle ne s'immisce pas dans les questions de priorité.

PARIS — IMPRIMERIE C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES

DES

PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR

LOIS, DÉCRETS, ARRÊTÉS ET AUTRES ACTES

CONCERNANT

L'ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

6e SÉRIE

TOME XIV

1887

2e SEMESTRE

PARIS

Vve Ch. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Augustins, 49

ANNALES
DES
PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS
RELATIFS
A L'ART DES CONSTRUCTIONS
ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR

N° 40

LA VIE ET LES TRAVAUX
DE
M. AUGUSTE GRAEFF
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES DE 1re CLASSE
ANCIEN VICE-PRÉSIDENT DU CONSEIL GÉNÉRAL
DES PONTS ET CHAUSSÉES.

Par M. DELOCRE, Inspecteur général des Ponts et Chaussées.

M. Graeff (Auguste), Inspecteur général des Ponts et Chaussées de 1re classe, ancien vice-président du conseil général des Ponts et Chaussées, est décédé, le 6 août 1884, dans sa propriété de Boisset (département de la Loire).

Graeff, par les remarquables travaux qu'il a exécutés, par les ouvrages importants qu'il a publiés sur l'art de

l'Ingénieur, non moins que par ses qualités éminentes, a mérité d'être rangé parmi les Ingénieurs qui ont le plus illustré le corps des Ponts et Chaussées.

J'ai eu l'heureuse fortune de servir pendant quatre années sous les ordres de Graeff, c'est à ce titre que je dois l'honneur de venir redire sa vie et ses travaux, conformément à une pieuse tradition du corps des Ponts et Chaussées.

I. — États de services.

Auguste Graeff est né le 11 mars 1812, à Schelestadt (Bas-Rhin).

Après de solides études classiques il entra à l'École potytechnique et, quatre ans plus tard, en sortant de l'École des Ponts et Chaussées, il fut chargé de l'arrondissement de Saverne (Bas-Rhin), en qualité d'aspirant Ingénieur.

Nommé Ingénieur ordinaire de 2e classe, le 7 mai 1840, il resta attaché au même arrondissement, qu'il conserva jusqu'à sa nomination au grade d'Ingénieur en chef.

Il fut chargé successivement, à la résidence de Saverne, des travaux de construction du canal de la Marne au Rhin et des travaux d'établissement d'une des parties les plus difficiles du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Graeff fut nommé, le 16 mai 1847, Ingénieur ordinaire de 1re classe.

Le zèle et la capacité exceptionnels qu'il déploya dans le service important dont il était chargé lui valurent, le 7 août 1850, la croix de la Légion d'honneur.

Nommé le 1er janvier 1856 Ingénieur en chef de seconde classe, Graeff fut appelé, peu après, au service du département de la Loire, qu'il conserva jusqu'à sa promotion au grade d'Inspecteur général.

Il fut mis à même, dans ce département, de déployer ses éminentes qualités d'ingénieur et d'administrateur.

Parmi les nombreux travaux qu'il eut à exécuter, les plus remarquables sont la mise en état des chaussées des routes nationales qui étaient ruinées sur plusieurs points, l'assainissement et l'irrigation de la plaine du Forez, la construction du magnifique barrage du Gouffre d'Enfer et la distribution d'eau de Saint-Étienne.

Graeff fut nommé, le 1er mai 1863, Ingénieur en Chef de 1re classe.

Le grade d'officier de la Légion d'honneur, qui lui fut conféré le 14 août 1861, fut la juste récompense des remarquables travaux exécutés par lui comme Ingénieur en chef de la Loire.

Les éminents services rendus par Graeff soit comme Ingénieur ordinaire, soit comme Ingénieur en chef, avaient marqué sa place au conseil général des ponts et chaussées. Il y entra le 1er juin 1869, fut nommé Inspecteur général de 1re classe le 5 mars 1875 et reçut, en 1879, le plus beau couronnement de carrière auquel puisse aspirer un Ingénieur par sa nomination au poste de vice-président du conseil général des ponts et chaussées.

Il exerça les fonctions de premier Ingénieur de France pendant quatre années et tous les membres du conseil ont encore présentes à l'esprit les remarquables qualités qu'il déploya dans ces difficiles fonctions.

A tous ces honneurs Graeff joignit celui d'être chargé du portefeuille des travaux publics, auquel l'appelait la situation prépondérante qu'il occupait dans le corps des ponts et chaussées.

L'heure de la retraite sonna trop tôt pour Graeff, car il avait encore toute l'activité nécessaire pour continuer à occuper le poste qu'il remplissait si dignement ; mais la retraite fut pour lui aussi remplie de travail que l'avait été la période d'activité.

Il en profita pour terminer un grand ouvrage sur l'hydraulique qui le range parmi les maîtres dans cette branche si importante de la science de l'ingénieur.

Il venait de mettre la dernière main à cette œuvre lorsque la mort est venue le frapper.

Il s'est éteint, le 6 août 1884, entouré de sa femme, de son fils, de sa fille et de son gendre qu'il chérissait, après avoir reçu les secours et les consolations de la religion en catholique fervent.

Son épouse, digne compagne de sa vie, n'a pu supporter une séparation si cruelle et elle ne lui a survécu que quelques mois.

II. — Travaux exécutés.

Canal de la Marne au Rhin. — Peu d'Ingénieurs ont eu à exécuter des travaux aussi considérables et aussi variés que Graeff.

Comme Ingénieur ordinaire il a pris la part la plus active à la construction du canal de la Marne au Rhin et du chemin de fer de Paris à Strasbourg, dans les parties les plus difficiles du parcours de ces deux voies de communication.

La juxtaposition du canal et du chemin de fer a donné lieu à de très grandes difficultés dans l'établissement des tracés, on n'a pu en triompher que par des études patiemment poursuivies.

Graeff a dirigé les travaux de la section du canal comprenant le bief de partage des Vosges et le versant du Rhin.

L'établissement de cette section a donné lieu à la construction de nombreux ouvrages d'art et à l'exécution de terrassements fort importants.

Les terrains traversés présentaient des difficultés particulières, et il a été nécessaire d'exécuter, dans les tran-

chées, des travaux de consolidation qui ont été disposés d'une manière fort remarquable.

L'étanchement des biefs a également donné lieu a de grandes difficultés dont Graeff a su triompher par l'emploi de procédés divers judicieusement appliqués.

Chemin de fer de Paris à Strasbourg. — Graeff a exécuté la partie du chemin de fer de Paris à Strasbourg comprenant la traversée de la chaîne des Vosges et s'étendant dans les limites du service de construction du canal de la Marne au Rhin qui lui était confié.

Les travaux d'art et les terrassements auxquels a donné lieu l'établissement de cette section du chemin de fer ne le cèdent en rien comme importance à ceux du canal. Le tracé du canal ne comportait aucun tunnel, celui du chemin de fer en comprend trois dont les longueurs varient de 300 à 500 mètres.

Tous les travaux du canal et du chemin de fer ont été exécutés avec une rare perfection et ils peuvent être donnés comme des modèles.

Travaux d'entretien des routes de l'arrondissement de Saverne. — Les soins donnés par Graeff à l'établissement du canal de la Marne au Rhin et du chemin de fer de Paris à Strasbourg ne lui faisaient pas délaisser l'entretien des routes du service ordinaire de l'arrondissement de Saverne dont il était chargé. Il trouvait dans son activité infatigable et dans sa haute capacité professionnelle les moyens de satisfaire aux exigences les plus multiples. Non seulement il apportait tous ses soins à maintenir dans le meilleur état les routes de sa circonscription, mais il étudiait avec persévérance les perfectionnements à apporter aux méthodes d'entretien. Graeff a mis en pratique, dans l'arrondissement de Saverne, la méthode d'entretien par rechargement généraux cylindrés, qui lui a permis, plus tard, de reconstituer les

chaussées du département de la Loire, et il a évidemment contribué puissamment à faire pénétrer cette méthode dans la pratique de l'entretien des chaussées empierrées.

Travaux exécutés dans le département de la Loire. — Comme Ingénieur en chef du département de la Loire, Graeff a étudié et exécuté des ouvrages fort importants qui auraient suffi à illustrer sa carrière d'Ingénieur, s'il n'avait déjà été classé, à son arrivée dans le département, parmi les meilleurs constructeurs des Ponts et Chaussées.

Le département de la Loire offrait un vaste champ à l'activité de Graeff et, sous sa puissante impulsion, de remarquables projets ne tardèrent pas à être étudiés et mis à exécution.

Il s'appliqua d'abord à mettre en état les chaussées des routes nationales, qui étaient ruinées sur plusieurs points, notamment aux abords de Saint-Étienne. La circulation très active des voitures transportant les charbons, les minerais de fer et les produits très lourds des usines métalliques, rendait particulièrement difficile la reconstitution des chaussées. Grâce à l'activité de Graeff, les méthodes d'entretien insuffisantes qui étaient mises en pratique ne tardèrent pas à être abandonnées, des matériaux plus résistants que ceux employés jusque-là furent recherchés et trouvés. La méthode d'entretien par rechargements cylindrés fut employée sur toutes les routes d'une fréquentation importante et bientôt, à la place de chaussées boueuses et sillonnées d'ornières profondes, on put voir des chaussées roulantes résistant bien aux lourds chargements qu'elles avaient à supporter.

En même temps qu'il donnait tous ses soins à la reconstitution des chaussées et à la bonne direction d'un des services ordinaires les plus chargés, Graeff se livrait

à l'étude des grands travaux qui devaient lui acquérir, dans la Loire, une renommée impérissable.

Le département de la Loire est à la fois industriel et agricole; la ville de Saint-Étienne est une vaste usine dans laquelle se trouvent réunis, une des manufactures d'armes de guerre les plus considérables du monde, de nombreuses fabriques d'armes de chasse, des ateliers importants de métallurgie, des fabriques de rubans. La plaine du Forez, par l'excellence du sous-sol formé des alluvions de la Loire, est une région agricole de premier ordre.

Au moment où Graeff est arrivé dans le département de la Loire, la ville de Saint-Étienne manquait d'eau potable et la population ouvrière était décimée périodiquement par la fièvre typhoïde; de plus, la ville était menacée par les crues du Furens qui avaient, à diverses reprises, causé des dégâts considérables. La plaine du Forez manquait d'eau pour les irrigations et elle était couverte d'étangs qui, se desséchant pendant l'été, devenaient un foyer pestilentiel.

Graeff appliqua tous ses soins à remédier à ce fâcheux état de choses et, pendant son séjour dans la Loire, en moins de treize années, il parvint à doter la ville de Saint-Étienne d'une remarquable distribution d'eau, à la préserver des inondations par la construction du magnifique barrage du Gouffre d'Enfer, à amener les eaux de la Loire dans la plaine du Forez à un niveau suffisant pour l'irriguer et à organiser la suppression progressive des étangs qui la rendaient insalubre.

Nous croyons devoir donner quelques détails sur ces grands travaux qui rendent de si importants services aux populations de la Loire.

Reconstitution des routes du département de la Loire. — L'œuvre de la reconstitution des chaussées des routes

nationales du département de la Loire, pour être moins brillante que les travaux remarquables exécutés dans la vallée du Furens et dans la plaine de Forez, ne fait pas moins d'honneur que ces travaux à l'éminent Ingénieur qui l'a réalisée.

L'épaisseur moyenne des chaussées empierrées du département qui n'était, en 1856, que de $0^m,067$ a été portée à $0^m,094$ en 1861; et cependant, dans cette période, les crédits d'entretien n'ont pas varié d'une manière sensible et, loin d'avoir augmenté, ont été en diminuant.

Le cube total des matériaux gagnés, pendant ces cinq années, s'est élevé à 48.000 mètres cubes, ce qui représente une somme de 624.000 francs, dépassant le quart des crédits consacrés à l'entretien pendant cette période.

Ce remarquable résultat a été obtenu par l'application de la méthode des rechargements cylindrés à l'entretien des routes de grande fréquentation, jointe à la réduction de la main-d'œuvre au strict nécessaire sur les routes moins fréquentées, que l'on a continué à entretenir par la méthode ordinaire.

La reconstitution des chaussées des routes de l'arrondissement de Saint-Étienne, fréquentées par les transports de l'industrie des fers, a rendu des services qui ont été justement appréciés par les industriels de la région.

Un calcul très simple permet de se rendre compte de ces services.

En 1854 et en 1855, la partie de la route nationale n° 88 comprise dans le département de la Loire était en si mauvais état que le prix des transports sur cette route s'élevait à $0^f,50$ par tonne et par kilomètre, tandis que dès l'année 1858 il s'abaissait déjà à $0^f,30$ au maximum.

Le tonnage diurne moyen constaté par les comptages officiels de 1856-1857 étant de 2.500 tonnes et le tonnage annuel de 912.500 tonnes, l'économie réalisée, pour l'ensemble des transports sur la longueur totale de la route

qui est de 20k,620, s'élève à la somme considérable de 3.763.150 francs.

Travaux exécutés pour préserver la ville de Saint-Étienne des inondations et assurer son alimentation en eau potable. — Au moment de l'arrivée de Graeff dans le département de la Loire, on étudiait depuis longtemps déjà, les moyens de doter la ville de Saint-Etienne d'une distribution d'eau potable en rapport avec sa population qui avait triplé, de 1830 à 1852, et était passée de 35.000 à 100.000 habitants.

Plusieurs projets avaient été étudiés mais aucun ne résolvait complètement la question. Celui qui obtint l'assentiment du conseil municipal de la ville fut présenté par Graeff, en mars 1858, et approuvé par décret du 30 avril 1859. Il consistait à dériver, au profit de la ville de Saint-Étienne, les sources de la partie supérieure de la vallée du Furens.

Les travaux à exécuter étaient complétés par la construction, sur ce cours d'eau, d'un réservoir ayant pour objet de préserver la ville de Saint-Étienne des inondations périodiques auxquelles elle était exposée, d'augmenter en été le cube d'eau à fournir, enfin de rendre aux usines l'eau qui devait être dérivée à leur détriment par l'acqueduc des sources. Le projet de ce réservoir fut approuvé par décret du 2 juin 1859. L'État se chargeait de faire exécuter les travaux du réservoir et s'engageait à concourir à la dépense pour une somme de 600.000 francs.

L'ensemble des travaux a donné lieu à une dépense de cinq millions de francs.

Ils ont été entrepris à la fin de l'année 1859, et n'ont été terminés qu'en 1866; mais, dès l'année 1863, les eaux de sources arrivaient à Saint-Étienne et étaient distribuées, dans les principaux quartiers de la ville, par l'ancienne canalisation.

Graeff a été secondé successivement, dans la construction de ces remarquables travaux, par deux Ingénieurs habiles MM. Conte-Grandchamp et de Montgolfier.

Les travaux relatifs à la distribution d'eau de la ville de Saint-Étienne comprennent le captage des sources, l'établissement d'un aqueduc d'adduction de 17.386 mètres de longueur, la construction de quatre réservoirs de distribution d'une capacité totale de 15.900 mètres cubes, la pose d'une longueur de 65.000 mètres de conduites, de 140 bornes-fontaines et de 250 bouches d'arrosage.

Le réservoir établi dans la vallée du Furens, au Gouffre d'Enfer, est obtenu à l'aide d'un barrage en maçonnerie de 50 mètres de hauteur qui ferme complètement la vallée.

Pour régler l'alimentation du réservoir, on a établi sur le lit du Furens, à 1.700 mètres en amont du barrage, une ventellerie de prise d'eau composée de dix vannes, dont cinq dirigent les eaux dans le réservoir et cinq autres sont en tête d'un canal de dérivation tracé à flanc de coteau et rejoignant le lit du Furens en aval du barrage.

La vidange du réservoir est assurée par un tunnel percé dans le contrefort séparant la vallée du Furens du vallon secondaire d'Issertine, ce tunnel renferme deux conduites en fonte, de $0^{m},40$ de diamètre, munies de robinets-vannes et encastrées, à leur origine, dans un massif de maçonnerie, de 16 mètres de longueur, séparant le tunnel du réservoir.

L'établissement d'un barrage de 50 mètres de hauteur exigeait des soins tout particuliers. Graeff et les deux Ingénieurs ordinaires qui l'ont secondé successivement se sont entièrement dévoués à la surveillance des maçonneries, dans lesquelles les malfaçons pouvaient conduire à de véritables catastrophes. Graeff s'était installé sur le

chantier même, dans une maison construite pour le garde du réservoir, et aucun détail de la construction n'a échappé à son œil exercé.

Le succès a complètement couronné ses efforts, et le barrage du Gouffre d'Enfer constitue un monument tout à fait remarquable que des Ingénieurs du monde entier viennent visiter.

Assainissement et irrigation de la plaine du Forez. — Les travaux d'assainissement et d'irrigation de la plaine du Forez ne comprennent pas d'ouvrages aussi importants que ceux qui viennent d'être décrits, mais leur conception et leur exécution a exigé de la part de Graeff la mise en œuvre de connaissances approfondies en hydraulique agricole jointes aux qualités les plus éminentes d'administrateur. Pour arriver à convaincre de l'excellence de son œuvre le conseil général du département de la Loire et les intéressés, Graeff a dû déployer de véritables qualités de diplomate, car les travaux projetés ne pouvaient être exécutés sans léser en apparence certains intérêts et sans se heurter à une routine agricole séculaire.

Les premières études qui avaient été faites pour améliorer le Forez datent de 1825; un crédit de 2.400 fr. fut voté, à cette époque, par le conseil général de la Loire pour le personnel et les opérations d'un essai d'assainissement, mais aucun crédit ne fut alloué les années suivantes.

En 1836, le conseil général du département, se préoccupant de l'insalubrité croissante de la plaine du Forez, demanda le concours de l'Administration pour les études à faire en vue d'y remédier, mais la question ne tarda pas à être perdue de vue. De 1843 à 1846, le conseil général alloua des crédits pour l'irrigation de la plaine du Forez, sans qu'il fût encore question de son assainissement.

Un projet très considérable d'irrigation fut présenté par M. Boulangé, Ingénieur en chef du département de la Loire, projet dont les détails avaient été étudiés avec le plus grand soin par M. l'Inspecteur général Lagrange, alors ingénieur de l'arrondissement de Montbrison.

Ce projet comportait la création d'un canal dérivé de la Loire qui était estimé à 5 millions et qui devait irriguer une superficie de 16.000 hectares et permettre de créer une navigation locale.

L'Administration n'admit pas ce double service, et une dépêche ministérielle prescrivit de faire l'étude d'un canal destiné uniquement à l'irrigation.

L'affaire ne fut pas poursuivie, sans doute parce qu'on reconnut que la question d'irrigation était prématurée et que celle de l'assainissement devait être résolue d'abord.

C'est M. Boulangé qui eut le premier cette idée pratique, elle fut reproduite ensuite par d'autres Ingénieurs qui lui ont succédé. Mais c'est à Graeff que revient l'honneur d'avoir fait aboutir à la fois la question de l'assainissement et celle de l'irrigation du Forez.

Il commença par dresser et mettre à exécution successivement les projets de desséchement de la plaine partagée en sept syndicats.

Pendant que les projets d'assainissement arrivaient à exécution, on entreprenait les études d'irrigation.

Graeff présenta, en 1861, l'avant-projet du canal à établir, dont le montant s'élevait à la somme de 4.450.000 fr.

Le débit du canal à l'étiage a été fixé à 5 mètres cubes par seconde, ce qui permet d'irriguer une surface de 8.000 hectares, égale au tiers de la superficie totale des terrains dominée par le canal.

Le mode d'exécution, proposé par Graeff et adopté par les pouvoirs publics, a consisté à faire exécuter les travaux par le département, avec une subvention de l'État et au moyen d'un emprunt au Crédit foncier, dont l'intérêt et

l'amortissement étaient assurés par la création de centimes additionnels et par les revenus du canal.

Il n'est pas besoin d'entrer dans de plus grands détails pour faire comprendre les difficultés de l'œuvre entreprise et menée à bonne fin par Graeff.

III. — Mémoires et publications.

Mémoires insérés dans les Annales des Ponts et Chaussées. — Les exigences des services laborieux que Graeff n'a jamais cessé de diriger, soit comme Ingénieur ordinaire, soit comme Ingénieur en Chef, ne l'ont pas empêché de faire paraître, sur diverses questions de l'art de l'Ingénieur, des publications d'une importance capitale et qui font de lui un maître dans cet art.

Graeff publia successivement, dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, des mémoires fort remarquables qui lui valurent une mention honorable, une médaille d'or de 300 francs et deux médailles d'or de 600 francs, décernées par le vote des ingénieurs.

Nous voudrions pouvoir analyser ici ces divers mémoires qui forment un résumé des connaissances les plus intéressantes de l'art de l'ingénieur dans l'entretien des routes, la construction des ouvrages hydrauliques, la construction des ponts biais, la construction des grands barrages en maçonnerie, les irrigations et les dessèchements, mais cela nous conduirait à dépasser les bornes forcément restreintes de notre notice, et nous devons nous borner à rappeler les titres de ces divers mémoires qui sont les suivants :

Mémoire sur l'emploi du rouleau compresseur dans l'entretien des routes (1851 — 2e semestre) ;

Mémoire sur l'appareil de construction des ponts biais (1852 — 2e semestre) ;

Mémoire sur les procédés de jaugeage et la solution de

quelques questions, relatives au régime des réservoirs, étudiées à propos du régime de l'étang de Goudrexange, réservoir du bief de partage du canal de la Marne au Rhin (1856 — 2e semestre);

Note à joindre au mémoire précédent (1857 — 1er semestre);

Note sur l'emploi du rouleau compresseur dans l'entretien des routes, réponse à M. Gasparin (1858 — 2e semestre);

Mémoire sur les routes du département de la Loire (1865 — 1er semestre);

Mémoire sur le mode de construction des grands barrages en maçonnerie (1866 — 2e semestre).

Mémoire sur l'assainissement et l'irrigation de la plaine du Forez (1871 — 1er semestre).

Mémoires présentés à l'Académie des sciences. — Trois mémoires présentés par Graeff à l'Académie des sciences furent admis à l'honneur de l'insertion dans le recueil des savants étrangers et valurent, en outre, à leur auteur le prix Dalmont, qui lui fut décerné par l'Académie, dans sa séance publique du 28 décembre 1874.

Ces mémoires portent les titres suivants :

Mémoire sur le mouvement des eaux dans les réservoirs à alimentation variable;

Mémoire sur l'action que la digue de Pinay exerce sur les crues de la Loire, à Roanne;

Mémoire sur l'application des courbes de débit à l'étude du régime des rivières et au calcul des effets produits par un système multiple de réservoirs.

Les deux premiers mémoires ont été réunis en un volume publié, en 1873, à la librairie Dunod.

Ouvrages publiés. — Outre les divers mémoires dont nous venons de parler, Graeff a publié trois ouvrages

importants concernant l'art de l'Ingénieur et portant les titres suivants :

Appareil et construction des ponts biais (Dunod, 1867);

Construction des canaux et des chemins de fer. Histoire critique des travaux exécutés dans les Vosges au chemin de fer de Paris à Strasbourg et au canal de la Marne au Rhin (E. Lacroix, 15, quai Malaquais, 1861);

Traité d'hydraulique, précédé d'une introduction sur les principes généraux de la mécanique (Paris, Imprimerie nationale, 1882-1883).

Appareil et construction de ponts biais. — L'ouvrage concernant la construction des ponts biais est une refonte et une extension du mémoire publié sur le même sujet, en 1852, dans les *Annales des Ponts et Chaussées.*

Cet ouvrage constitue un traité complet sur la matière où la netteté des considérations théoriques est jointe aux indications pratiques les plus détaillées.

Dans un premier chapitre sont développées les considérations générales sur la construction des ponts biais.

Le chapitre II est consacré à la détermination du développement d'une voûte cylindrique et de ses lignes d'assises dans le cas le plus général; l'auteur en déduit ensuite les cas particuliers les plus usités dans la pratique et indique les systèmes d'appareils approchés que l'on peut substituer aux lignes déterminées par la théorie, ainsi que les procédés de tracé en projection des lignes de joint.

La taille des voussoirs est traitée, avec de grands détails, dans le chapitre IV.

Un dernier chapitre est consacré à la comparaison des divers systèmes d'appareils et à la détermination des limites dans lesquelles chacun d'eux paraît devoir être employé.

Construction des canaux et des chemins de fer. —

Dans son histoire critique des travaux exécutés dans les Vosges, au chemin de fer de Paris à Strasbourg et au canal de la Marne au Rhin, Graeff traite, d'une façon magistrale, toutes les questions relatives à l'exécution des travaux de chemin de fer et des canaux.

Il s'est trouvé dans une situation qui lui a permis d'établir une comparaison très exacte des difficultés et des dépenses d'exécution de ces deux systèmes de voies de communication, ayant eu à exécuter un chemin de fer et un canal établis, côte à côte, dans un terrain présentant des difficultés spéciales de tracé et d'exécution.

Cet ouvrage important sera consulté avec le plus grand fruit par tous les Ingénieurs qui ont à construire des canaux et des chemins de fer.

L'ouvrage est divisé en deux parties : la première consacrée aux développements techniques, la seconde relative à l'évaluation analytique et détaillée des dépenses faites et au parti qu'on peut tirer de ces évaluations pour rendre exactes les estimations des avant-projets.

La première partie forme un véritable traité de la construction des canaux et des chemins de fer.

L'auteur y examine successivement les points suivants :

Tracés ;
Terrassements ;
Travaux accessoires aux terrassements ;
Ouvrages d'art, classification et discussion des types ;
Souterrains ;
Étanchements ;
Mise en eau du canal ;
Alimentation du canal.

La seconde partie donne, avec une clarté merveilleuse, des renseignements très précis et admirablement coordonnés sur les points suivants :

Dépenses des terrassements ;

Dépenses des ouvrages d'art;
Dépenses des souterrains;
Dépenses des stations, des passages à niveau, des maisons de gardes et d'éclusiers;
Dépenses des indemnités de terrains et de dommages;
Dépenses accessoires et frais divers;
Travaux de la voie du chemin de fer et de mise en eau du canal;
Comparaison des dépenses du chemin de fer et du canal.

Traité d'hydraulique. — Le traité d'hydraulique de Graeff est un ouvrage de longue haleine qui suffirait à lui seul pour le ranger parmi les maîtres de l'art de l'Ingénieur, s'il n'avait déjà tant de titres à cet honneur.

Cet ouvrage est le fruit d'études poursuivies avec patience, pendant de longues années, et il est vraiment merveilleux que Graeff, qui a toujours été chargé des services les plus laborieux, ait pu le mener à bonne fin.

Il comprend deux volumes, le premier consacré à la partie théorique, le second relatif à la partie pratique.

Le premier volume est partagé en deux grandes divisions; la première constitue une revue des principes généraux de la mécanique, la seconde est consacrée à la partie théorique de l'hydraulique.

Dans la première division Graeff traite successivement les points suivants :

I. *Statique.*

Des forces considérées au point de vue de la statique;
Composition et décomposition des forces;
Conditions d'équilibre d'un système des forces;
Cas où le système auquel sont appliquées les forces n'est pas libre; efforts sur les appuis;
Des forces moléculaires.

II. *Dynamique.*

Des forces considérées au point de vue le plus général;

Principes généraux;

Application des principes généraux aux cas du mouvement des corps solides qui peuvent trouver leurs analogies ou leurs applications dans l'hydrodynamique;

Considérations sur le mouvement complet d'un système rigide et inextensible dans l'espace.

La seconde division, hydraulique théorique, est partagée en deux parties : la première consacrée à l'hydrostatique et la seconde à l'hydrodynamique.

Dans la section relative à l'hydrodynamique sont examinés, successivement, le mouvement des fluides supposés parfaits, dans lequel il est fait abstraction du frottement, et le mouvement de l'eau en tenant compte du frottement.

Cette dernière partie comporte les divisions suivantes:

Du mouvement permanent à débit constant;

Du mouvement permanent à débit variable;

Régime variable par affluence lente;

Régime variable par affluence rapide.

Le second volume, qui a plus de 500 pages, constitue, à lui seul, un traité complet d'hydraulique.

Il est divisé en deux livres, le premier consacré au mouvement permanent, le second consacré au mouvement non permanent.

Dans le premier livre sont traitées, d'une manière méthodique et avec les plus grands détails, les questions suivantes :

Mouvement de l'eau dans un réservoir à régime permanent;

Mouvement permanent dans les tuyaux de conduite et les canaux découverts;
Mouvement uniforme dans les tuyaux de conduite et dans les canaux découverts;
Procédés de jaugeage;
Application des formules du régime permanent à quelques questions de travaux publics : distribution d'eau, canaux d'irrigation, etc.;

Le second livre est consacré à l'étude des questions suivantes :

Mouvement de l'eau dans un réservoir à régime variable;
Écoulement de l'eau d'un réservoir dans un autre;
Mouvement non permanent dans les conduites et les canaux découverts;
Étude pratique du régime des rivières;
Influence d'un système de réservoirs sur les crues d'une rivière;
Application du mouvement non permanent à quelques questions de travaux publics.

Lorsque l'on considère les grands travaux conçus et exécutés par Graeff, les services importants qu'il a eu à diriger pendant sa carrière d'Ingénieur; les ouvrages remarquables qu'il a publiés sur les diverses branches de l'art de l'Ingénieur, on demeure frappé d'admiration et on se demande comment un seul homme a pu suffire à une tâche aussi considérable.

C'est grâce à un travail soutenu de tous les jours, joint aux qualités de l'intelligence les plus remarquables, que Graeff a pu satisfaire, avec éclat, aux services importants qui lui ont été confiés et laisser après lui des

ouvrages qui contribueront à former des Ingénieurs dignes de marcher sur ses traces.

Les qualités de l'homme privé égalaient chez Graeff celles de l'Ingénieur et de l'homme de science. Il joignait au cœur le plus chaud, le sens le plus droit, l'esprit le plus ouvert et le caractère le mieux trempé.

C'était un père de famille modèle, il avait eu le bonheur de trouver une compagne digne de lui, et il a laissé des enfants qui ont hérité de toutes ses qualités et qui ajouteront à l'héritage d'honneur qu'il lègue à sa famille.

Il a eu la joie bien grande de voir son fils entrer dans notre grande famille polytechnique et servir avec honneur dans cette arme de l'artillerie, illustrée par tant de nos camarades; il a eu le bonheur enfin de donner sa fille à un Ingénieur des Ponts et Chaussées, digne de lui succéder dans une carrière qu'il aimait avec passion.

Graeff, par sa haute intelligence, par son savoir étendu, par son expérience consommée dans l'art de l'Ingénieur, par son désintéressement et son dévouement absolu à la chose publique, a mérité d'être inscrit à une place d'honneur sur le livre d'or des Ponts et Chaussées.

Puisse le souvenir de tant d'Ingénieurs illustres inscrits sur les pages de ce livre, nous soutenir dans nos efforts et nous inspirer la noble ambition d'augmenter le riche patrimoine qu'ils nous ont légué !

Puissent les ombres vénérées de ces vaillants étendre leur protection sur le corps qu'ils ont illustré et sur l'École polytechnique, notre mère commune!

Paris, le 22 mars 1887.

N° 41

NOTICE

SUR LA

CONSTRUCTION DU CANAL DE LENS A LA DEULE

Par MM. GRUSON, Ingénieur en chef
et BARBET, Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées.

Historique. — Avant la Révolution, il existait un canal reliant la Ville de Lens au canal de la Deûle à Courrières, par la vallée de la Souchez. Cette voie navigable avait été construite, vers le commencement du XVI[e] siècle, par la Ville de Lille qui voulait ainsi se mettre en communication avec l'Artois.

Vers 1693, la Deûle fut, à partir de Courrières, rattachée avec la Scarpe; et comme cette rivière avait été rendue navigable entre Arras et Douai, Lille se trouva reliée avec la capitale de l'Artois et l'embranchement de Courrières à Lens perdit beaucoup de son importance.

La Ville de Lens, à laquelle incombait l'entretien en vertu d'une transaction passée entre les magistrats de Lens et de Lille le 2 septembre 1619, s'adressa en vain aux États d'Artois pour être déchargée d'une partie des frais qu'il entraînait. Faute de ressources suffisantes, elle laissa dépérir son canal qui fut définitivement comblé

vers 1791. Il ne reste plus aujourd'hui aucune trace apparente des digues ni des ouvrages d'art.

Depuis lors, la Ville de Lens a, à différentes reprises, fait des efforts pour obtenir le rétablissement de cette voie navigable.

En 1842, notamment, elle avait fait étudier un projet qui n'eut aucune suite. Il est vrai que, à cette époque, elle était loin d'avoir l'importance qu'elle a aujourd'hui. Le bassin houiller du Pas-de-Calais n'était pas découvert (*) et l'on ne pouvait prévoir le développement que l'industrie était appelée à prendre dans la région.

En 1854, la Société des Mines de Lens, qui commençait à extraire la houille, sollicita la concession d'un canal de Lens à la Deûle. Mais cette demande ne paraît pas avoir été prise en considération.

Plus tard, la Compagnie des Mines de Courrières obtint, par décret du 30 avril 1862, la concession de la partie de ce canal comprise entre Harnes et la Deûle à Courrières.

Cette voie navigable, connue sous le nom de canal de la Souchez, a une longueur de 3^{k},469 ; elle présente un mouillage de 2 mètres, un plafond de 6 mètres de largeur, et elle est munie de gares de croisement.

En 1885, la Compagnie concessionnaire a porté à 38^{m},50 la longueur utile de l'écluse de Courrières, de sorte que le canal livre passage à tous les bateaux fréquentant les canaux du Nord.

Depuis plus de dix ans, la Ville de Lens et la Compagnie des Mines de Liévin, appuyées par le Conseil général du Pas-de-Calais, réclamaient le prolongement, jusqu'à Lens, du canal de la Souchez.

Elles se déclaraient prêtes à concourir à la dépense

(*) Cette découverte date de l'année 1851.

dans une large mesure et, grâce aux efforts persistants de M. l'Inspecteur général Bertin, alors Ingénieur en chef du service spécial des voies navigables du Nord et du Pas-de-Calais, la loi du 5 août 1879, relative au classement et à l'amélioration des voies navigables, a compris parmi les lignes secondaires à créer la construction d'un canal de Lens à la Deûle.

L'avant-projet de ces travaux a été déclaré d'utilité publique par décret en date du 28 mars 1881. La dépense était estimée 1.500.000 francs. La Société de Liévin garantissait à l'État le versement d'une subvention de 500.000 francs, comprenant une part contributive de 100.000 francs consentie par la Ville de Lens.

Le projet définitif a été approuvé par décision ministérielle du 29 février 1884. Une loi du 1er septembre suivant ayant accepté l'offre faite par la Compagnie de Liévin d'avancer à l'État la somme de un million destinée à parfaire le montant de l'estimation, les travaux ont pu être adjugés en deux lots les 13 décembre 1884 et 30 mai 1885.

Le canal est aujourd'hui livré à l'exploitation; la présente notice a pour objet de rendre compte des principales dispositions adoptées dans sa construction.

Nous devons dire auparavant quelques mots encore de son utilité.

Utilité du canal. — Le canal de Lens à la Deûle pénètre dans une région éminemment industrielle. Il relie au réseau des voies navigables la Ville de Lens dont la population atteint, d'après le dernier recensement, 11.780 habitants et qui est, pour ainsi dire, la capitale de l'important bassin houiller du Pas-de-Calais. Il passe à proximité d'un grand nombre de fosses appartenant aux Compagnies de Lens et de Courrières, les deux plus considérables de ce bassin. Il dessert les mines de Liévin

qui n'étaient encore, dans ces derniers temps, raccordées avec aucune voie d'eau (*).

Le trafic probable du nouveau canal a été évalué au chiffre de 290.000 tonnes, susceptible, selon les prévisions, de s'accroître dans l'avenir.

D'ailleurs, l'utilité en ressort clairement des sacrifices que se sont imposés les intéressés pour en obtenir la création.

Tracé (Pl. 30, *fig.* 1). — Le canal de Lens à la Deûle a son origine à la route nationale n° 25 du Havre à Lille. A partir de cette route, il descend la vallée, coupe le chemin de fer particulier des mines de Lens et le chemin de fer du Nord en utilisant des ponts existants sur la rivière la Souchez, puis suit à peu près le lit de ce cours d'eau jusqu'à la route nationale n° 43 et au moulin supérieur de Lens qu'il a supprimé. Il laisse à gauche le moulin inférieur, traverse la Souchez en aval de cette usine, et se développe ensuite sur la rive gauche, en passant sous le chemin de fer de Lens à Armentières, jusqu'au canal concédé auquel il se soude immédiatement en aval du chemin de grande communication n° 39.

		mètres
La longueur du tracé est de		7.826
Comprenant des alignements droits sur	6.196	7.826
Et des courbes sur	1.630	
Les rayons des courbes ne sont pas inférieurs à 300m.		
Si l'on ajoute, à la longueur nouvellement construite, le développement du canal de la Souchez, soit.		3.469
On obtient pour la longueur totale du canal de Lens à la Deûle.		11.295

(*) En 1885, ces trois compagnies houillères ont extrait, savoir :

Compagnie de Lens.	1.118.400	tonnes
— de Courrières	788.698	—
— de Liévin	466.843	—

L'extraction totale du bassin houiller du Pas-de-Calais s'est élevée à 6.112.269 tonnes.

Profil en long (Pl. 30, *fig.* 2). — La pente totale du nouveau canal est de $9^m,71$, rachetée par trois écluses.

La première a été établie immédiatement en amont de la route nationale n° 43; la seconde à la sortie de Lens; la troisième dans le marais d'Annay (territoire d'Harnes).

Leurs chutes respectives sont de $2^m,51$ pour l'écluse n° 1 et de $3^m,60$ pour chacune des deux autres.

Les longueurs des biefs sont indiquées ci-après :

	mètres	
1er bief.	1 601,30	7.826,00
2e —	342,30	
3e —	3.704,65	
4e — (jusqu'à l'origine du canal de la Souchez).	2.177,75	

Profils en travers. — Le nouveau canal est exécuté à une seule voie comme le canal de la Souchez qui lui fait suite.

Les profils en travers sont conformes aux dispositions prescrites par la circulaire ministérielle du 19 juillet 1880.

La largeur, dans les alignements droits, est de 6 mètres au plafond théorique, établi à 2 mètres en contre-bas du niveau de navigation, soit $5^m,40$ au plafond réel arasé à $0^m,20$ plus bas.

Dans les courbes, la largeur a été calculée d'après la formule : $6^m,00 + \frac{380}{R}$.

Une gare de croisement de 10 mètres au plafond théorique et d'environ 100 mètres de longueur a été ménagée à peu près tous les kilomètres. On a, autant que possible, établi ces gares dans des courbes à grands rayons, de manière à raccorder insensiblement les élargissements avec la section normale du canal.

Un bassin de virement de 40 mètres de diamètre au plafond a été créé entre les voies ferrées des mines de

Lens et du Nord, l'orientation des ponts et l'espace restreint compris entre eux ne permettant pas d'y intercaler une courbe d'un rayon suffisant.

Deux garages de 10 mètres de largeur pour le stationnement des bateaux ont été établis : l'un de 700 mètres de longueur à l'origine du canal; l'autre de 550 mètres à l'extrémité.

Enfin, le canal de la Souchez a été élargi de 6 mètres sur une longueur de 800 mètres au droit du rivage de la Société des mines de Courrières, de façon à laisser à la Compagnie concessionnaire la jouissance complète de ce port.

Les chemins de halage et de contre-halage ont 4 mètres en couronne. Le chemin de halage seul est empierré sur une largeur de $2^{m},50$.

Bétonnages et corrois. — En amont de la troisième écluse, le canal est ouvert, sur une longueur de 500 mètres environ, dans la craie fendillée au travers de laquelle s'établissait une communication entre les biefs d'amont et d'aval.

Cette portion de la cunette a dû être revêtue d'une chemise en béton jusqu'à $0^{m},30$ au-dessus du niveau de navigation. Le bétonnage a été exécuté conformément aux principes développés dans le Cours de navigation intérieure professé à l'École des Ponts et Chaussées par M. l'Inspecteur général Guillemain : nous n'insisterons donc pas sur ce sujet.

Nous dirons seulement que la dépense par mètre courant de canal s'est élevée à $55^{f},10$ et que le résultat a été tout à fait satisfaisant.

En amont du pont du chemin de fer des mines de Lens, sur une centaine de mètres de longueur, les terrains à l'état de marais formant l'assiette du canal avaient été remblayés de longue date par la Compagnie à l'aide de

pierres de fosses. Le massif ainsi constitué est essentiellement perméable.

Un essai de bétonnage a été également tenté dans cette partie, mais on a dû reconnaître que, dans la circonstance, ce mode d'étanchement ne pouvait donner que de mauvais résultats.

En effet, le niveau de l'eau des marais qui, dans cette région, bordent le canal de Lens à la Deûle sur ses deux rives, est inférieur au niveau du canal mais supérieur à celui du plafond. En cas de vidange du bief, une sous-pression considérable était donc à craindre.

D'un autre côté, le sol est sujet à des affaissements occasionnés par les exploitations souterraines et dont nous dirons quelques mots à la fin de la présente notice: la chemise en béton n'aurait donc pas tardé à être disloquée.

On a eu recours à un autre procédé consistant à isoler complètement le canal des marais par la confection, dans chaque digue, d'un corroi argileux traversant toute la couche perméable et descendu à $4^{m},20$ en contre-bas du niveau de navigation. En outre, on a renforcé ces digues comme le représente le profil en travers de la planche 30.

L'étanchéité est assurée aujourd'hui, par ces corrois, d'une manière complète.

Écluses (Pl. 30, *fig.* 4, 5, 6). — On n'a pas jugé utile, sur une voie navigable secondaire, de faire application des derniers perfectionnements qui ont pour but d'accroître, autant que faire se peut, la rapidité des manœuvres (aqueducs de vidange et de remplissage; portes à un seul vantail; manœuvre hydraulique des portes, etc.). D'ailleurs, le trafic devant se faire presque entièrement en descente, cette application n'eût ici présenté qu'un médiocre intérêt.

Les écluses sont donc du type ordinaire, avec ventelles dans les portes busquées.

Elles ont 5m,20 de largeur et 38m,50 de longueur utile, dimensions fixées par la loi du 5 août 1879.

Sauf pour l'écluse n° 3, où des circonstances spéciales, dont nous parlerons plus loin, ont conduit à réduire légèrement le mouillage, la profondeur adoptée a été de 2m,50.

Chaque écluse présente un double mur de chute : l'un en amont de la chambre des portes d'amont; l'autre au droit des chardonnets, couronné par le busc à 1m,40 au-dessus du radier du sas (Pl. 30, *fig.* 5), soit à 1m,10 en contre-bas du niveau de navigation d'aval. Dans une note insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées*, année 1885, 2e semestre, nous avons montré par l'expérience que cette disposition paraît être celle qu'il convient d'adopter pour obtenir le minimum de durée du remplissage du sas.

En amont et en aval de chaque écluse, le canal est élargi, sur une longueur de 40 mètres et symétriquement sur les deux rives, de manière à porter à 17m,20 sa dimension au plafond et à ménager, de chaque côté de la passe de 5m,20, l'espace nécessaire pour le garage d'un bateau. Des murtins en maçonnerie soutiennent les talus au droit de ces garages (Pl. 30, *fig.* 4).

L'écluse n° 1 est accompagnée d'une décharge latérale pour l'écoulement des eaux excédant les besoins de la navigation.

On a établi, sur la tête aval, un pont fixe pour la route nationale n° 43. Cette disposition n'est pas très recommandable en elle-même, mais on n'aurait pu l'éviter qu'en expropriant des bâtiments de grande valeur.

La construction de cette écluse n'a donné lieu à aucune difficulté bien spéciale. Elle a dû seulement être fondée sur pilotis avec enceinte complète en pieux et palplanches moisés.

L'écluse n° 2 a pu être fondée directement sur le terrain résistant. Elle n'a nécessité que des épuisements ordinaires.

Les fouilles de l'écluse n° 3 étaient, à partir d'un certain niveau, ouvertes dans la marne aquifère. L'abondance des eaux y était très considérable et le débit croissait à peu près proportionnellement à la profondeur ; il convenait donc de réduire celle-ci dans toute la mesure du possible, en vue de restreindre tout à la fois l'importance et la durée des épuisements.

Or il résulte de nombreuses expériences faites sur le canal de la Sensée et la Scarpe-Moyenne et dont nous avons consigné les résultats dans la note déjà citée (*Annales* 1885, 2e semestre) que l'on accélère dans une très faible proportion seulement l'entrée des bateaux dans une écluse en donnant au mouillage sur le busc d'aval une valeur supérieure à 2m,30. Nous avons donc pu, sans inconvénient, réduire en cours d'exécution de 0m,20 la profondeur de la troisième écluse du canal de Lens à la Deûle. Pour n'apporter aucune modification aux appareils de pierres de taille et aux portes, il a suffi de relever de 0m,20 le niveau des couronnements.

En outre, eu égard à l'excellente nature du sol, l'épaisseur de la fondation a été diminuée et la concavité du radier supprimée d'une manière complète. Pour résister à la sous-pression, nous avons eu recours à l'emploi de vieux rails disposés en croix de Saint-André, noyés dans le béton et encastrés sous les bajoyers de l'écluse.

Le débit par 24 heures, au fond de la fouille, n'en a pas moins atteint le chiffre énorme de 90.000 mètres cubes. La puissance totale utilisée pour évacuer ce volume a été portée jusqu'à 131 chevaux-vapeur. Les dépenses d'épuisement de l'écluse n° 3 se sont élevées à 73.115 francs.

Portes d'écluses (Pl. 31; *fig.* 1 à 8). — Les portes d'écluses du canal de Lens à la Deûle sont à ossature métallique avec bordage en charpente.

L'Administration supérieure ayant, dans ces dernières années, appelé d'une manière toute particulière l'attention des ingénieurs sur l'emploi de ces portes mixtes, nous croyons qu'il peut être intéressant d'entrer dans quelques détails sur les dispositions adoptées, qui ont reçu plusieurs fois déjà la sanction ministérielle dans le service des voies navigables du Nord et du Pas-de-Calais.

Ces dispositions sont inspirées de celles des portes de l'écluse d'Ablon, sur la haute Seine (voir la notice de M. l'Ingénieur Lavollée, *Annales des ponts et chaussées*, 1882, 1er semestre), mais elles en diffèrent d'autant plus que cette écluse s'écarte davantage, comme dimensions, du type défini par la loi du 5 août 1879.

Le cadre est formé de quatre poutres ayant chacune la section d'un double T de $0^m,25$ de hauteur et de $0^m,25$ de largeur de semelles, constituant les entretoises supérieure et inférieure, le poteau tourillon et le poteau busqué.

La position de la première entretoise intermédiaire à partir du bas de la porte est déterminée par la hauteur des ventelles de vidange et de remplissage du sas.

Une autre entretoise divise en deux parties égales l'intervalle compris entre le dessus des vannes et l'entretoise supérieure de chaque vantail. Pour les portes d'amont de l'écluse nº 1, cette division a été suffisante; mais pour les cinq autres paires de portes, qui ont jusqu'à $7^m,015$ de hauteur, on a dû partager encore en deux intervalles égaux chacun des deux panneaux ainsi obtenus.

La carcasse métallique a été consolidée, pour les portes les moins hautes, par une double écharpe; pour les autres, par deux écharpes doubles superposées

comme l'indiquent nos dessins (Pl. 31, *fig.* 6); pour toutes, par deux lames de tôle verticales appliquées sur les poteaux tourillons et busqués et par une ou deux pièces de tôle centrales auxquelles on a relié l'armature.

Le calcul des différentes pièces de la carcasse métallique a été fait conformément aux principes développés dans la note annexe n° 2 du mémoire de M. Lavollée. Les fers ne travaillent en aucun point à plus de 6 kilogrammes par millimètre carré.

Des fourrures en bois garnissent les poteaux busqués, la face aval des entretoises inférieures et la face amont des poteaux tourillons.

Le bordage a été formé de madriers en chêne dont l'épaisseur, variable de $0^m,06$ à $0^m,07$, a été déterminée en adoptant pour la résistance une valeur limite de 60 kilogrammes par centimètre carré.

Les ventelles de remplissage et de vidange sont en fonte et à jalousies. Afin d'éviter, à leur retombée, le choc de fonte sur fer, une pièce de bois boulonnée a été interposée entre la cornière qui la supporte et le châssis mobile.

Les appareils de manœuvre des portes se composent d'un arc denté fixé sur l'entretoise supérieure et mis en mouvement par un système d'engrenages renfermé dans une colonnette en fonte scellée sur les bajoyers de l'écluse.

Abstraction faite de ces appareils et de la ventellerie, la dépense a varié, par vantail, de $1.462^f,90$ à $2.703^f,80$, pour une hauteur variable également de $4^m,725$ à $7^m,015$.

Elle fait ressortir une moyenne de $109^f,15$ à $135^f,95$ par mètre carré.

Ouvrages pour l'écoulement des eaux. — Le canal de Lens à la Deûle est alimenté par la rivière la Souchez qui s'y déverse, rive droite, à 190 mètres de l'origine,

par un aqueduc en plein-cintre de 1m,60 d'ouverture et de 1m,60 de hauteur sous clef.

Divers petits ouvrages sans intérêt ont dû être établis à la rencontre de fossés sans importance.

Nous avons vu qu'une décharge latérale a été accolée à l'écluse n° 1.

En aval de cette écluse, rive gauche, a été construit un vannage de décharge qui a pour objet d'alimenter, à l'aide des eaux excédant les besoins de la navigation, le moulin inférieur de Lens respecté par le tracé du canal et d'écouler au besoin, en temps de crues, tout le débit de la Souchez.

Ces eaux reprennent, à partir de ce point, le cours de la rivière qui passe en siphon sous le canal immédiatement en aval de l'écluse n° 2.

Ouvrages pour le rétablissement des communications. — Les ouvrages pour le rétablissement des communications ne présentent aucune particularité digne d'arrêter longuement l'attention.

Ils consistent :

1° En un pont fixe, biais à 67° 34′, sur la tête aval de la première écluse, pour le passage de la route nationale n° 43, et dont nous avons parlé plus haut;

2° En un autre pont fixe métallique de 21m,30 de portée sur le chemin de grande communication n° 39, qui franchit, au raccordement avec le canal de la Souchez, le nouveau canal et le chemin de halage sans aucune réduction de section;

3° En une passerelle pour piétons, bestiaux et brouettes, au territoire d'Harnes;

4° En deux ponts-levis de 5m,20 de largeur, d'un type tout à fait analogue à celui qui est figuré par les planches nos 50 et 51 du recueil annexé à la circulaire ministérielle du 1er juin 1883 et qui est depuis longtemps ap-

pliqué dans le service des voies navigables du Nord et du Pas-de-Calais.

Chaque culée est traversée par une arche en plein-cintre de 1^{m},20 d'ouverture et de 2^{m},80 de hauteur sous-clef pour l'écoulement des eaux ; de petits murtins en maçonnerie construits en amont et en aval en dégagent la section et en rendent utile tout le débouché.

Traversée des voies ferrées. Ponts sous les chemins de fer des mines de Lens et de Lens à Armentières. — Comme nous l'avons vu, le canal de Lens à la Deûle traverse trois lignes ferrées :

Le chemin de fer particulier des mines de Lens ;

Le chemin de fer du Nord ;

Le chemin de fer de Lens à Armentières.

Cette dernière ligne a été construite par l'État. Les Ingénieurs chargés de la construction avaient, d'accord avec le service de la navigation, établi un ouvrage spécial pour le passage de la voie navigable. Il nous a suffi de creuser la cunette sous cet ouvrage et d'y élever des murs de soutènement pour les banquettes de halage et de contrehalage.

Le pont existant sous le chemin de fer des mines de Lens est fondé sur un radier général en maçonnerie arasé à plus de 2 mètres en contre-bas du niveau du premier bief. Il avait d'ailleurs une ouverture et une hauteur suffisantes. La construction d'une banquette de halage avec aqueduc de décharge pour faciliter l'échappement de l'eau a donc été le seul travail à y exécuter.

Pont sous le chemin de fer du Nord. — Le pont existant à la traversée de la rivière de la Souchez, sous la gare de Lens, l'une des plus importantes du réseau du Nord, était en maçonnerie et à culées perdues. Sa voûte en arc de cercle avait 8^{m},62 d'ouverture et sa longueur totale était de 36 mètres.

Les piédroits de ce pont reposaient sur une série d'arcades dont les piliers avaient été fondés très bas parce qu'il avait fallu traverser un banc épais de tourbe pour trouver un terrain suffisamment résistant : c'est cette circonstance qui a permis d'utiliser l'ouvrage.

Mais on ne pouvait que bien difficilement obtenir sous la voûte une hauteur libre de $3^m,70$. — D'un autre côté, par suite de l'affaissement du sol que nous avons signalé déjà, cette voûte s'était profondément lézardée et avait subi des mouvements tels que l'on ne pouvait sans danger exécuter le moindre déblai contre l'intrados et les culées.

Il fallait donc absolument se résoudre à la remplacer par un tablier métallique.

La Compagnie du Nord devant, dans un avenir peu éloigné, être obligée de réaliser cette substitution pour assurer la sécurité de son exploitation, on a pu se mettre d'accord avec elle et lui faire accepter la combinaison suivante :

L'État devait effectuer à ses frais toutes les maçonneries.

La Compagnie exécuterait le tablier métallique, ainsi que le déplacement et le rétablissement des voies, et la dépense correspondante serait partagée par moitié entre les deux administrations.

Cette transaction était, à tous les points de vue, avantageuse pour notre service qui ne risquait point ainsi de compromettre l'exploitation de la gare de Lens. Aussi M. le Ministre des travaux publics y donna-t-il son approbation.

Les travaux qui concernaient la navigation, exécutés par voie de régie, ont consisté dans la démolition de la voûte; dans la restauration et l'aménagement des piédroits dont les arcades ont été fermées par des masques en maçonnerie; et dans l'établissement d'une banquette

de halage de 2^m,50 de largeur avec aqueduc de décharge. L'élévation et la coupe transversale (Pl. 32, *fig.* 1 et 2) rendent clairement compte de ces dispositions.

Il fallait nécessairement procéder par parties, mais le travail nous a été singulièrement facilité par la Compagnie du Nord qui, en vue de préparer la réalisation d'un projet général d'agrandissement de la gare intérieure de Lens, s'est décidée à prolonger tout d'abord de 17 mètres vers l'amont les culées du pont à aménager (voir Pl. 32, *fig.* 3).

Grâce à la pose provisoire, sur ce prolongement, de trois poutres du tablier et à un ripage de voies convenablement entendu, la partie aval de la voûte, sur une longueur de 25 mètres, nous a été livrée d'un seul coup pour la démolir et élever ensuite les culées (Pl. 32, *fig.* 4). Quelques fermes de cintres consolidaient, pendant la durée de cette phase de l'opération, la partie amont qui supportait les voies principales.

On pouvait dès lors poser les deux tiers du tablier et rétablir ces voies principales dans leur situation définitive, ce qui rendait disponible la tête amont de la voûte et permettait d'achever les travaux de maçonnerie (Pl. 32, *fig.* 5).

Il ne restait plus enfin, pour compléter le tablier, qu'à poser trois poutres nouvelles et à ramener à leur emplacement définitif les trois dernières poutres primitivement établies sur le prolongement du pont (Pl. 32, *fig.* 6).

Ces dispositions ont permis de reconstruire, en somme, presque entièrement l'ouvrage, sans arrêter un seul instant l'exploitation de la gare de Lens et sans que l'on ait eu à déplorer aucun accident.

Rivages publics. — On a depuis longtemps reconnu la nécessité d'établir, sur les voies navigables, des ports ou rivages publics pour l'embarquement et le débarque-

ment des marchandises. La loi du 5 août 1879 a compris de nombreux travaux de ce genre parmi les améliorations à réaliser sur les canaux de la région qui nous occupe.

Aussi le canal de Lens à la Deûle a-t-il été doté de ports ou rivages au nombre de quatre.

Chacun d'eux comprend : 1° un élargissement du canal sur 120 mètres de longueur de manière à obtenir le garage de trois bateaux en dehors du chenal. La longueur du rivage public de Lens seul a été portée à 240 mètres à cause de l'importance de la localité à desservir ;

2° La création, au droit de ce garage, d'un terre-plein de 15 mètres de largeur, muni d'une chaussée pavée de 6 mètres et sur lequel s'effectuent le dépôt des marchandises et la circulation des voitures.

Alimentation. — Nous avons vu que le canal de Lens à la Deûle est alimenté par la rivière la Souchez qui s'y déverse, rive droite, à peu de distance de l'origine.

Le débit de cette rivière, pendant tout le cours de l'exécution des travaux, notamment durant la longue période de sécheresse de l'été de 1886, n'est pas descendu au-dessous de 130 litres par seconde et s'est plus généralement maintenu dans le voisinage de 170 litres. Ces chiffres confirment les résultats de jaugeages antérieurs.

Or, en tenant compte des pertes par les portes d'écluses, par évaporation et infiltration et de la dépense d'eau nécessitée par le passage des bateaux pour l'écluse dont la chute est la plus grande, on trouve qu'un tonnage de 290.000 tonnes exige un débit de 70 litres par seconde. Une notable partie du volume de la Souchez reste donc disponible pour le fonctionnement des usines et pour parer, dans l'avenir, à tous les besoins de la navigation.

D'ailleurs, les trois derniers biefs reçoivent un certain nombre de petits affluents, de sorte que le volume con-

sommé par le premier bief est inférieur au chiffre indiqué, d'autant plus que la première écluse est celle dont la chute est la moins forte.

Durée d'exécution des travaux et montant des dépenses. — Comme nous l'avons dit, les travaux ont été mis en adjudication en deux lots les 13 décembre 1884 et 30 mai 1885. Ils ont été attaqués le 1er février 1885 et le canal a été livré à l'exploitation le 30 octobre 1886 : l'exécution a donc duré vingt et un mois environ.

La surveillance en a été confiée à M. le conducteur Larivière, qui s'y est distingué par son intelligence, son zèle et son activité.

Les deux entreprises ont été menées avec beaucoup de vigueur.

Le cahier des charges du second lot, qui comprenait les cinq derniers kilomètres du canal, notamment la construction de la troisième écluse, imposait à l'entrepreneur l'obligation de terminer les travaux dans un délai de quinze mois qui n'a pas été dépassé, malgré de nombreuses difficultés imprévues.

La dépense réelle s'élève en totalité, tant pour les travaux terminés que pour certains parachèvements restant à faire, au chiffre de 1.864.000 francs, qui se décompose de la manière suivante :

	francs	francs
Terrassements.	378.700	
Bétonnages et corrois.	57.975	
Ouvrages d'art.	896.700	1.864.000
Pavages, empierrements et divers.	69.725	
Indemnités de terrains.	460.900	
Pour une longueur de.		7.826 m.
Soit par kilomètre.		238.180 fr.

Gare d'eau des mines de Liévin. — La Société des mines de Liévin a construit, immédiatement en amont du

canal de Lens à la Deûle, une gare d'eau pour l'embarquement de ses charbons qui y sont amenés par une voie ferrée reliant toutes ses fosses et déversés des wagons dans les bateaux par des couloirs à bec mobile.

Cette gare d'eau est mise en communication avec le canal par un pont fixe métallique, biais à 64° 07′ et de 7 mètres d'ouverture droite, sur la route nationale n° 25.

Elle a une longueur de 280 mètres et une largeur en plafond de 22m,50. Elle est bordée de murs de quai sur ses deux rives et fermée par un mur de fond. Le mur de gauche supporte les appareils d'embarquement. Sa hauteur maximum est de 8m,10, et il est surmonté d'un remblai de 4m,30 à la crête duquel circulent les wagons. Le mur de droite sert uniquement de soutènement au chemin de halage.

En amont du pont sur la route n° 25, les maçonneries sont disposées de manière à constituer un bassin de virement de 40 mètres de diamètre.

Affaissements occasionnés par les exploitations souterraines. — Les exploitations houillères donnent lieu, pour divers motifs et notamment par le fait des éboulements successifs qui se produisent dans les galeries souterraines abandonnées après l'extraction, à des affaissements qui se manifestent de proche en proche jusqu'à la surface du sol.

Ces effets sont très sensibles dans le bassin du Pas-de-Calais, en particulier dans le périmètre de la concession des mines de Lens.

Toutefois l'existence du canal de Lens à la Deûle n'en est en rien compromise.

En effet, les affaissements atteignent seulement le premier bief et s'étendent dans toute sa longueur On conçoit dès lors la possibilité d'obvier aux inconvénients qui pourraient en résulter en abaissant suc-

cessivement le niveau de navigation, le plafond du canal descendant en même temps que les digues.

L'écluse n° 1 permet de le faire sans difficulté. Son premier mur de chute est en effet arasé à $2^m,78$ en contre-bas du niveau de navigation primitif : l'abaissement peut donc être d'au moins $0^m,58$ avant de toucher aux maçonneries. Ce mur de chute a lui-même une hauteur de $1^m,08$. En le recoupant au besoin au fur et à mesure que la nécessité s'en fera sentir, on pourra donc réaliser un abaissement total de : $0^m,58 + 1^m,08 = 1^m,66$, sans toucher aux portes.

Mais la gare d'eau des mines de Liévin, au moins dans sa partie amont où sont installés les appareils d'embarquement, n'est pas assujettie quant à présent au mouvement descendant que nous venons de signaler.

Les variations de niveau pourraient donc avoir à un moment donné pour la Société des conséquences graves, en l'obligeant à modifier ces appareils et à faire des approfondissements susceptibles de compromettre la solidité des maçonneries. Aussi a-t-elle, sous le pont de la route nationale n° 25, et avons-nous, de notre côté, sous le pont du chemin de fer du Nord, ménagé une hauteur libre supérieure à la dimension réglementaire de $3^m,70$. Quant au pont sous le chemin de fer des mines de Lens, il est très élevé au-dessus du niveau de navigation.

Si cette hauteur se réduisait au point de devenir insuffisante avant que les exploitations houillères aient régularisé et uniformisé les affaissements, le relèvement des tabliers métalliques, accompagné de quelques rechargements de digues, pourrait facilement s'effectuer au prix de dépenses relativement peu considérables.

Enfin, comme dernière ressource, la Société de Liévin pourrait se mettre à l'abri des variations de niveau en construisant, immédiatement en aval du pont sur la route nationale n° 25, une écluse qui maintiendrait, dans sa

gare, le plan d'eau à la hauteur constante qu'elle jugerait convenable d'adopter, tandis que des abaissements successifs seraient réalisés dans le premier bief du canal, comme nous l'avons dit plus haut.

La question a été étudiée déjà en toute éventualité et sera, le cas échéant, reprise.

Du reste, la Société des mines de Lens a poussé très activement ses travaux souterrains sous le canal avant et pendant sa construction même, de sorte que les effets ultérieurs seront sans doute moins prononcés.

Quoi qu'il en soit, on voit que l'on dispose, pour obvier aux inconvénients résultant des affaissements, de moyens divers et sûrs qui permettent d'être rassuré sur les conséquences de ces mouvements.

Lille, le 6 décembre 1886.

N° 42

LES TARIFS
DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT
EN ALLEMAGNE

Par M. C. BAUM, Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

EXPOSÉ.

Les *Annales des ponts et chaussées* ont publié, en 1882 et 1884, nos deux études sur les systèmes de tarifs des chemins de fer appliqués sur les réseaux de l'État, en Belgique et en Autriche-Hongrie; il a paru utile de donner également l'analyse du système de tarification adopté sur l'important réseau des chemins de fer de l'État en Allemagne, et de compléter ainsi, dans les *Annales*, la série des études sur les tarifs des réseaux de l'État à l'étranger.

Le système actuel des tarifs de transport des marchandises sur les chemins de fer allemands, qui est en vigueur depuis 1877 (*), présente une différence essentielle avec

(*) Une décision ministérielle, en date du 15 mai 1877, nous avait chargé d'une mission spéciale en Allemagne, dans le but d'étudier le système des tarifs de petite vitesse en vigueur sur les chemins de fer allemands. Dans notre rapport de mission de 1877, nous avons analysé le système uniforme des tarifs de marchandises dont le gouvernement allemand venait de prescrire l'application, à dater du 1er octobre 1877, sur tout le réseau allemand Nous reproduirons, dans la présente étude, quelques-unes des considérations et observations contenues dans le rapport de mission précité.

les méthodes de tarification en usage dans les autres pays de l'Europe. Le tarif général allemand ne contient pas de classification de marchandises ; la taxe à appliquer est indépendante de la valeur de la marchandise et ne dépend que de son poids, de son volume et de son conditionnement. Seuls, les trois tarifs spéciaux, qui font partie intégrante du tarif général allemand, s'appliquent à des marchandises dénommées dans une nomenclature. L'ancien système des tarifs allemands, qui avait été en vigueur antérieurement à 1877, contenait, au contraire, une classification des marchandises basée sur des règles à peu près analogues à celles adoptées dans les tarifications des chemins de fer dans les autres pays de l'Europe.

Dix années environ se sont écoulées depuis l'application du système actuel des tarifs allemands, système édifié sur des principes tout différents de ceux qui avaient guidé dans l'établissement des tarifs de marchandises antérieurs à 1877. Il est donc possible aujourd'hui de juger la valeur de ce système par l'étude des résultats financiers et économiques que son application à donnés. La recherche de ces résultats a d'autant plus d'intérêt que le principe qui sert de base au tarif général allemand est nouveau.

Pour être complète et donner une image exacte des tarifs de transport en vigueur en Allemagne, notre étude contiendra les règles relatives aux taxes perçues pour les transports, aussi bien en grande qu'en petite vitesse.

Nous consacrerons un premier chapitre à l'examen des tarifs de voyageurs et des bagages. Le second chapitre renfermera l'esquisse du système allemand des tarifs de marchandises ainsi que des conditions de délai des transports et dé garantie.

Dans les troisième et quatrième chapitres, nous ferons l'analyse critique du système des tarifs de grande et de petite vitesse des chemins de fér allemands, et enfin ,

dans un dernier chapitre, nous indiquerons les conclusions de cette étude sur les tarifs de marchandises allemands.

Nous parlerons plus spécialement dans ce qui suivra des tarifs des chemins de fer de l'État en Prusse, dont le réseau atteignait un développement de 21.184 kilomètres, à la fin de l'exercice 1885-1886 (*).

CHAPITRE Ier.

VOYAGEURS. — BAGAGES.

Transport des voyageurs.

Le tarif des voyageurs sur le réseau de l'État de Prusse comprend quatre classes; les taxes par voyageur et par kilomètre sont différentes suivant qu'il s'agit de trains express et poste, ou de trains omnibus. Les trains express et poste ont, en général, des voitures de Ire, de IIe et de IIIe classes; les trains omnibus ont des voitures de IVe classe.

En Alsace-Lorraine, en Bavière, dans le duché de Bade, les trains express n'ont pas, en général, de voitures de IIIe classe.

Trains omnibus. — Les taxes par voyageur transporté

(*) D'après la statistique officielle que vient de publier l'Office impérial des chemins de fer de l'Allemagne pour l'exercice 1885-1886, la longueur exploitée dans l'empire allemand a été de 37.368 kilomètres, se décomposant comme il suit :

Chemins de fer de l'État.	32.699	kilomètres.
Chemins de fer concédés exploités par l'État.	385	—
Chemins de fer concédés exploités par des compagnies . . .	4.284	—
Total.	37.368	kilomètres.

à un kilomètre par trains omnibus, sont les suivantes :

			centimes.
Ire classe, par	voyageur et kilomètre	. . . .	10,0
IIe classe	—	—	7,5
IIIe classe	—	—	5,0
IVe classe	—	—	2,5

Sur le réseau d'Alsace-Lorraine, les taxes perçues par voyageur et par kilomètre sont :

	centimes.
En Ire classe	10,0
IIe classe.	6,625
IIIe classe.	4,25

Aucun impôt n'est perçu en Allemagne sur le prix des transports des voyageurs ou des marchandises.

Trains express. — La surtaxe pour le transport des voyageurs par trains express diffère d'un réseau à l'autre ; sur un même réseau, elle varie quelquefois suivant le parcours. Cette surtaxe s'élève aux chiffres suivants sur le réseau de la direction royale de Bromberg :

En Ire classe . . .	12,5	pour 100 de la taxe	des trains	omnibus.
IIe classe . . .	11,5	—	—	—
IIIe classe. . .	17,5	—	—	—

En Alsace-Lorraine, la surtaxe d'express s'élève :

En Ire classe, à. .	13,75	pour 100 de la taxe	des trains	omnibus.
IIe classe . . .	20,75	—	—	—

Les voyageurs des trains omnibus qui, en cours de route, désirent passer dans un train express ou poste paient un supplément qui est fixé suivant les différents cas qui peuvent se présenter, sur le réseau d'État de Prusse, comme il est indiqué ci-après :

					centimes.	centimes.
Ire classe express	=Ire classe omnibus	+ IVe cl. omnibus	=	10 + 2,5	= 12,5
Ire »	=IIe »	+ IIIe »	=	7,5 + 5,0	= 12,5
IIe »	=IIe »	+ IVe »	=	7,5 + 2,5	= 10,0
IIe »	=IIIe »	+ IIIe »	=	5,0 + 5,0	= 10,0
IIIe »	=IIIe »	+ IVe »	=	5,0 + 2,5	= 7,5

Ainsi, lorsqu'un voyageur est muni d'un billet de train omnibus, s'il veut, à un moment quelconque de son voyage, prendre un train express, il devra payer pour le parcours à effectuer un supplément obtenu en ajoutant aux taxes des trains omnibus des Ire, IIe et IIIe classes, la taxe de la IVe classe. Dans ce cas, la surtaxe d'express est constante en valeur absolue pour les trois classes, et égale au prix d'un billet de IVe classe.

La surtaxe d'express à payer en cours de route représente, par suite, sur les chemins de fer de la Prusse :

25 pour 100	pour les voyageurs	de Ire	classe.
33	—	— IIe	—
50	—	— IIIe	—

La IVe classe de voyageurs n'existe que sur les ré seaux d'État de la Prusse et de la Saxe.

Minimum de perception.

Le minimum de perception varie d'une classe à l'autre et d'une catégorie de trains à l'autre.

Express.

Minimum de la perception	en	Ire classe . . .	0f,625
—	—	IIe.	0 ,50
—	—	IIIe	0 ,375

Omnibus et directs.

Minimum de la perception	en	Ire classe . . .	0f,50
—	—	IIe.	0 ,375
—	—	IIIe	0 ,25
—	—	IVe.	0 ,125

Tarif de transport des enfants.

Les enfants âgés de moins de dix ans sont transportés aux conditions ci-après :

Deux enfants prendront ensemble un billet de la classe et des trains utilisés.

Une grande personne accompagnée d'un enfant de moins de dix ans prendra :

En Ire classe, un billet de Ire et un billet de IIe classe.
En IIe classe, un billet de Ire classe.
En IIIe classe, un billet de IIe classe.
En IVe classe, un billet de IIIe classe.

Un enfant seul au-dessous de dix ans prendra :

En Ire classe, un billet de IIe classe.
En IIe classe, un billet de IIIe classe.
En IIIe classe express, un billet de IIIe classe train omnibus.
En IIIe classe omnibus, un billet de IVe classe train omnibus.
En IVe classe omnibus, un billet de IVe classe train omnibus.

Les enfants âgés de moins de quatre ans ne paient rien s'ils n'occupent pas une place spéciale. Les enfants âgés de plus de dix ans paient place entière.

Billets d'aller et retour.

Les billets d'aller et retour sont valables pendant deux jours, sur les chemins de fer d'État de Prusse, et pendant trois jours en Alsace-Lorraine. Les voyageurs munis de ces billets peuvent utiliser tous les trains réglementaires y compris les trains poste et express.

Lorsque le jour de la délivrance du billet est un dimanche ou un jour de fête, le délai est prolongé d'un jour en Prusse.

Le voyageur porteur d'un billet d'aller et retour peut interrompre une fois son voyage à l'aller ainsi qu'au retour.

La taxe d'un billet d'aller et retour est obtenue sur le réseau prussien, en majorant de 50 p. 100 la taxe d'un voyage simple. Ainsi, pour les trains omnibus, les tarifs par voyageur et par kilomètre pour l'aller et le retour sont :

Ire classe . . . . $10 + \frac{10}{2} = 15$ centimes.

IIe classe . . . . $7,5 + \frac{7,5}{2} = 11,25$ —

IIIe classe. . . . . $5 + \frac{5}{2} = 7,5$ —

La réduction que présente le prix d'un billet d'aller et retour, par rapport au double prix d'un billet simple, est de 25 p. 100.

Les billets d'aller et de retour sont délivrés par toutes les gares et stations pour toutes les gares et stations du réseau.

Sur le réseau d'empire, en Alsace-Lorraine, pour un voyage d'aller et retour, on prend :

En Ire classe, un billet de Ire classe, plus un billet de IIIe classe.
En IIe classe, un billet de Ire classe.
En IIIe classe, un billet de IIe classe.

Trains spéciaux. — Wagons-salons. — Wagons de malades. — Compartiments loués.

Les taxes à payer pour un train spécial sont les suivantes :

Par kilomètre de train spécial.

1° Pour la locomotive . . . . 1^f^,50
2° Pour chaque essieu de voiture à voyageurs ou de wagon-salon . . . . 0^f^,50
3° Pour chaque essieu de wagon ou fourgon . . . 0^f^,25

La taxe minima à percevoir est de 5 francs par kilomètre, et le minimum de la perception fixé à 125 francs (112^f^,50 en Alsace-Lorraine).

Lorsque les conditions de charge des trains ou de déclivité du profil en long exigent l'emploi d'une seconde locomotive, la taxe de 1^f^,50, par kilomètre, est perçue

ments ne peuvent pas être utilisés. La durée d'un abonnement d'écolier doit être au minimum d'un mois. Le prix est le même, que les écoliers aient plus ou moins de dix ans.

Le prix de transport des écoliers coûte, en abonnement, sur le réseau d'Alsace-Lorraine, par écolier et par kilomètre.

	centimes.
En IIe classe.	0,9375
En IIIe classe	0,875

Bagages et chiens.

Chaque voyageur, porteur d'un billet d'aller dans une des trois premières classes, ainsi que les voyageurs munis de billets circulaires en IIe et IIIe classes, valables pendant six semaines, ont droit, sur les réseaux d'État de Prusse, à une franchise de bagages de 25 kilogrammes. Les voyageurs munis d'un billet ordinaire d'aller et retour, ainsi que les abonnés, n'ont droit à aucune franchise.

Ne sont considérés comme bagages que les effets appartenant au voyageur et qu'il emporte avec lui. Les caisses ou tonneaux contenant des marchandises, ainsi que tout autre objet ne servant pas au besoin du voyageur ne sont pas considérés comme bagages ayant droit à la franchise de 25 kilogrammes.

Les excédants de bagages sont taxés à raison de 0,625 centimes, par fraction indivisible de 10 kilogammes et par kilomètre. Le minimum de la perception est de 0f,25.

En Alsace-Lorraine, il n'y a pas de franchise de bagages; les bagages sont taxés par fraction indivisible de 5 kilogrammes, à raison de 2,65 centimes, par kilomètre. Le minimum de la perception est de 0f,375.

Les bagages à la main, emportés dans les voitures des trois premières classes, doivent être petits, facilement transportables, et ne pas gêner les autres voyageurs. Le poids des bagages, outils, paniers, etc..., que les voyageurs de la IVe classe emportent avec eux en voiture, ne doit pas dépasser 35 kilogrammes.

Chiens. — Le transport des chiens est taxé, sur les les chemins de fer de la Prusse, à raison de 1,875 centimes par chien et par kilomètre. Le minimum de la perception est de 12,5 centimes.

Déclaration de la valeur et intérêt à la livraison des bagages.

Le règlement d'exploitation des chemins de fer allemands permet au voyageur, en cas de perte ou d'avarie de ses bagages en cours de route, d'obtenir une indemnité égale au dommage causé. Il suffit pour cela qu'il déclare à la gare expéditrice la valeur de ses bagages et qu'il paie une taxe d'assurance égale à 2 p. 1000 de la valeur déclarée, par fraction indivisible du parcours de 150 kilomètres. Le minimum de la perception est de 25 centimes. Lorsque le voyageur n'a pas déclaré la valeur de ses bagages, l'indemnité maxima est de 15 francs par kilogramme de bagages perdu ou avarié.

Le voyageur peut également faire, dans la gare expéditrice, la déclaration de l'intérêt à la livraison; il paie, dans ce cas, une taxe d'assurance de 2 p. 1000 de la somme déclarée, par fraction indivisible de parcours de 150 kilomètres. Le minimum de la perception est de 1^f,25. Lorsque le voyageur a ainsi déclaré l'intérêt à la livraison, si ses bagages ne lui sont pas livrés à temps, il a droit à une indemnité égale à la somme déclarée.

L'indemnité normale à laquelle un voyageur a droit

dans le cas où il n'a pas été fait de déclaration pour l'intérêt à la livraison, s'élève au maximum à 0f,25 par kilogramme des bagages non livrés à la gare destinataire et par jour de retard.

CHAPITRE II.

TARIFS DES MARCHANDISES EN GRANDE ET EN PETITE VITESSE.

Le système des tarifs uniformes de marchandises adopté en Allemagne, depuis 1877, par tous les chemins de fer, est un compromis entre le système de tarifs d'Alsace-Lorraine (*) et celui de la classification des marchandises d'après leur valeur ; il a emprunté au *système naturel* la classe unique d'expéditions partielles, et ses

(*) Le système de tarifs d'Alsace-Lorraine, appelé aussi *système naturel*, ne tenait compte que du poids de la marchandise et pas du tout de sa valeur. La taxe appliquée dans ce système variait aussi suivant que l'expéditeur employait pour ses transports un wagon couvert ou un wagon découvert. Les classes des tarifs d'Alsace-Lorraine de 1872 étaient les suivantes :

CLASSES DU TARIF D'ALSACE-LORRAINE	TAXE d'expédition par tonne	TAXE de transport par tonne et kilomètre
	francs	centimes
Expéditions partielles	2,00	10,544
Expédition en charge de wagon couvert, si l'expédition est d'au moins 5 tonnes	1,50	7,908
Expédition en charge de wagon couvert, par tonne supplémentaire (au delà de 5 tonnes)	0,60	5,222
Expédition en charge de wagon découvert, si l'expédition est d'au moins 5 tonnes	1,50	5,222
Expédition en charge de wagon découvert, par tonne supplémentaire (au delà de 5 tonnes)	0,60	2,611
Tarif spécial	1,00	2,611

Le tarif spécial était seul applicable à des articles dénommés ; il ne contenait que des matières premières, au nombre de quinze.

classes de marchandises en charge de wagon à taxe réduite ; il a abandonné la distinction faite, au point de vue de la taxation, par le tarif d'Alsace-Lorraine, entre les wagons couverts et les wagons découverts ; il a pris au système de la classification le principe de l'établissement de ses trois tarifs spéciaux.

Classes du tarif général allemand.

Le livret des tarifs généraux allemand qui régit les transport des marchandises sur le réseau de l'Allemagne, comprend les divisions suivantes :

Grande vitesse.

Messagerie. — *a.* Expéditions partielles.
— *b.* Expéditions par wagon complet.

Petite vitesse.

Classe des expéditions partielles.

Expéditions par wagon complet.

Classe A_1. — Si l'expédition est d'au moins 5 tonnes.
Classe B. — Si l'expédition est de 10 tonnes.

Tarifs spéciaux.

Classe A_2. — Pour des expéditions d'articles des tarifs spéciaux en poids de 5 tonnes.

Tarif spécial I. / — II. / — III. } Expédition des articles dénommés dans chaque tarif spécial, en poids de 10 tonnes.

Grande vitesse.

Il y a une classe pour les expéditions partielles de la messagerie. La taxe appliquée est double de celle à laquelle sont tarifées les expéditions partielles de petite vitesse.

Les expéditions de grande vitesse, faites par wagon

complet, sont tarifées à la double taxe de transport des classes de marchandises par wagon complet de la petite vitesse.

Ainsi, en règle générale, la messagerie est transportée à la double taxe des expéditions en petite vitesse.

Le tarif contient une prescription spéciale relative au cas où, sur la demande de l'expéditeur et avec le consentement de l'administration du chemin de fer, le transport de la messagerie a lieu par train express. La taxe devient dans ce cas double de la taxe ordinaire de grande vitesse, c'est-à-dire qu'elle est égale à quatre fois la taxe de la petite vitesse.

La taxe minima à percevoir pour la grande vitesse est fixée à 0f,625 par expédition.

Pompes funèbres. — Le transport d'un cercueil, lorsqu'il est effectué par un train omnibus, est taxé à 0f,50 par kilomètre ; si le transport a lieu par train express, la taxe kilométrique est de 0f,75. La taxe d'expédition qui est perçue en sus s'élève dans les deux cas à 7f,50.

La personne qui accompagne le cercueil pourra emporter gratuitement, dans le wagon où se trouve le cercueil, une partie des effets du défunt sans que le poids de ces effets puisse dépasser 500 kilogrammes.

Équipages. — Les voitures de toutes sortes, vides, et qui ne peuvent pas être chargées dans des wagons couverts avec d'autres marchandises, lorsqu'elles sont expédiées en grande vitesse, sont taxées, dans le cas où leur transport s'effectue par un train omnibus, à 0f,50 par kilomètre et par wagon, et à 0f,75 lorsque le transport a lieu par express. Dans les deux cas, la taxe d'expédition s'élève à 7f,50 par wagon. Le chargement et le déchargement sont à effectuer respectivement par l'expéditeur et par le destinataire. Si ces manutentions sont

faites par l'administration du chemin de fer, il est perçu des frais accessoires de :

2f,50 pour chaque voiture chargée,
1f,25 par voiture vide.

Délais de livraison. — Le délai de livraison de la messagerie se compose d'un délai de transport et d'un délai d'expédition.

Le délai d'expédition pour la messagerie est de un jour, et le délai de transport, de un jour pour chaque fraction indivisible de 300 kilomètres de distance à parcourir.

Petite vitesse.

Toute expédition qui n'est pas remise au transport en grande vitesse, ni par wagon complet, est taxée comme expédition partielle.

Le minimum de la perception pour les expéditions partielles est de 0f,375.

Les marchandises non dénommées dans les tarifs spéciaux et remises en charge de wagon, sont tarifées à la classe A_1, si l'expédition est en poids d'au moins 5 tonnes par wagon, et à la classe B, si l'expédition est de 10 tonnes.

Les taxes des tarifs spéciaux ne sont appliquées aux marchandises dénommées dans ces tarifs que lorsque les articles sont remis en poids de 10 tonnes. Si ces marchandises sont livrées au chemin de fer en poids inférieur à 10 tonnes, mais supérieur ou au moins égal à 5 tonnes, il est perçu la taxe de la classe A_2.

Taxes de transport par tonne et par kilomètre.

Les taxes de transport par tonne et par kilomètre appliquées sur les chemins de fer de l'État de Prusse, sont indiquées dans le tableau suivant.

Outre les taxes de transport par tonne et par kilomètre indiquées ci-après, il est perçu une taxe d'expédition par tonne de marchandise. Cette taxe d'expédition varie pour les diverses classes du tarif général (*).

CLASSES DU TARIF ALLEMAND		TAXE par tonne et par kilomètre	TAXE d'expédition par tonne
		centimes	francs
Messagerie.	Expéditions partielles	27,5	5,00
Petite vitesse.	Expéditions partielles	13,75	2,50
—	Classe A_1	8,375	2,50
—	Classe B	7,5	1,50
—	Classe A_2	6,25	1,50
—	Tarif spécial I	5,625	1,50
—	— II	4,375	1,50
—	— III	2,75	1,50

Les expéditions d'un poids inférieur à 20 kilogrammes sont tarifées pour 20 kilogrammes. Au-dessus de 20 kilogrammes, le poids des expéditions est calculé par fraction indivisible de 10 kilogrammes arrondi à la dizaine supérieure.

Lorsque le tarif uniforme du transport des marchandises fut mis en vigueur sur tout le réseau allemand,

(*) Cette taxe d'expédition constitue la fraction du prix de transport qui est indépendante du parcours de la marchandise. En raison de l'importance de cette taxe, il résultera pour les transports effectués à de petites distances, un tarif moyen assez élevé, alors même que le prix d'application par tonne et par kilomètre, d'après le tarif général, est faible. Prenons un article du tarif spécial n° III transporté, d'une part, à 30 kilomètres et, d'autre part, à 300 kilomètres.

Le tarif moyen par tonne kilométrique, dans le premier cas, sera de :

$$\frac{30 \times 0,0275 + 1,50}{30} = 0^f,0775;$$

dans le deuxième cas, il s'élèvera à :

$$\frac{300 \times 0,0275 + 1,50}{300} = 0^f,0325.$$

Le prix du transport par tonne et par kilomètre peut varier, suivant la distance parcourue par un même article du tarif spécial n° III, du simple au double.

chaque État de l'empire resta maître de fixer les taxes à appliquer, par tonne et par kilomètre, aux diverses classes du tarif uniforme allemand. Aussi, y eut-il, en 1877, dans les différents États de l'empire, une assez grande diversité de taxes par tonne et kilomètre pour les classes du nouveau tarif. L'uniformité du tarif allemand ne s'étendait donc qu'aux diverses classes du nouveau tarif et à la nomenclature des articles des trois tarifs spéciaux. Les taxes appliquées dans chaque classe étaient fixées par le gouvernement de l'État fédéral sur le territoire duquel se trouvait le chemin de fer.

Depuis 1877, sous l'influence de la pression exercée par la chancellerie impériale, divers États ont adopté, peu à peu, sur leurs réseaux, les taxes unitaires du réseau d'État de Prusse, et, à côté de l'uniformité des classes, on est arrivé presque partout à l'uniformité des taxes, par tonne et par kilomètre, pour les diverses classes et les trois tarifs spéciaux.

Classes générales de marchandises par wagon complet.

Sont transportées, aux prix des classes A_1 et B, toutes les marchandises qui ne sont pas contenues dans la classification des tarifs spéciaux et des tarifs d'exception, lorsque ces marchandises sont remises par l'expéditeur par wagon complet, avec *une* lettre de voiture, et chargées dans *un* wagon, et qu'il n'est pas prescrit, pour certains articles, d'autres conditions dans les dispositions réglementaires spéciales.

Sont taxées, au prix de la classe A_1, les expéditions d'au moins 5.000 kilogrammes par wagon, ou payant pour ce poids, et au prix de la classe B, les expéditions d'au moins 10.000 kilogrammes par wagon, ou payant pour ce poids.

Le calcul des prix de transport pour ces classes a lieu

sur base du prix de la classe A_1 et du poids réel chargé par wagon, avec minimum de perception correspondant à 5.000 kilogrammes pour chaque wagon. Si toutefois la taxe de la classe B, appliquée à 10.000 kilogrammes donnait un prix inférieur, c'est ce dernier qui serait à percevoir.

Tarifs spéciaux I, II et III.

Sont transportées, aux taxes des tarifs spéciaux, les marchandises désignées dans la classification des articles auxquels s'appliquent ces tarifs, lorsque l'expéditeur les remet au chemin de fer avec *une* lettre de voiture et en poids d'au moins 10.000 kilogrammes pour *un* wagon, ou qu'il acquitte le prix de transport sur base de ce tonnage. Les marchandises des tarifs spéciaux remises en poids inférieur à 10.000 kilogrammes, mais supérieurs à 5.000 kilogrammes par wagon, ou payant la taxe pour au moins ce dernier poids par wagon, sont taxées au prix de la classe A_2, toutes les fois que la taxe des tarifs spéciaux appliquée à 10.000 kilogrammes ne donnerait pas un prix de transport plus avantageux pour l'expéditeur. Nous avons rejeté dans l'annexe la nomenclature des articles dénommés qui sont tarifés à la taxe de chacun des trois tarifs spéciaux.

Conditions générales pour les transports des marchandises par wagon complet.

Le groupage des marchandises différentes est autorisé en tant que les dispositions réglementaires ne s'y opposent pas, mais aucune garantie n'est acceptée par l'administration du chemin de fer en ce qui concerne l'avarie des marchandises l'une par l'autre. La charge d'un wagon peut, par conséquent, se composer d'articles différents classés dans un même tarif spécial, ou dans les

divers tarifs spéciaux, soit encore d'articles des tarifs spéciaux et d'autres marchandises quelconques (classes A_1 et B). Dans ces cas, on applique la taxe de la marchandise rangée dans la classe la plus élevée du tarif, à moins qu'il ne résulte un prix moins élevé en taxant isolément le poids de chaque article dont se compose l'expédition.

L'administration du chemin de fer a le droit de compléter, de son côté, le chargement des wagons dont l'expéditeur n'utiliserait pas entièrement la capacité ou la puissance de chargement. Dans ce cas, elle assume la responsabilité des avaries pouvant résulter du complément de la charge pour les marchandises chargées en premier lieu.

Tarifs d'exception.

Un certain nombre de marchandises des trois tarifs spéciaux, dénommées dans les tarifs de chaque réseau de chemin de fer en Allemagne, sont transportées à la taxe indiquée par des tarifs d'exception. Ces tarifs d'exception contiennent tantôt des prix fermes entre des gares dénommées, tantôt des barêmes s'appliquant à tout le réseau ou à une partie de ce réseau. Les taxes sont presque toujours proportionnelles à la distance; quelquefois elles sont différentielles.

L'application de ces tarifs d'exception a lieu, en général, dans les conditions suivantes : L'expédition devra être en poids d'au moins 10 tonnes, par wagon et par lettre de voiture, ou l'expéditeur devra payer pour ce poids. Lorsque l'expédition est en poids inférieur à 10 tonnes, mais pèse au moins 5 tonnes, ou que l'expéditeur paie pour un poids d'au moins 5 tonnes par wagon, les articles des tarifs d'exception sont transportés à la taxe de la classe A_2, si, toutefois, la taxe du tarif d'exception appliquée à 10 tonnes ne donne pas un prix de transport moins élevé.

Les articles qui, d'après les tarifs en vigueur sur les divers réseaux d'État en Allemagne sont transportés à la taxe d'un tarif d'exception, sont variables d'un réseau à l'autre.

Réseau de la direction royale de Berlin. — Il y a dix tarifs d'exception :

A Bois en grume, planches, poutres, traverses, etc. (tarif spécial II);
B Céréales;
C Lignites;
D et E Pierres de construction, dalles, briques, etc. (2 tarifs);
F Gravier;
G Sable et débris de verre;
H Dextrine, amidon.
J Plomb en masses, en barres, en tuyaux, en grenailles;
K Alcool pour l'exportation, par les ports de mer (tarif temporaire).

Le tarif d'exception A s'applique à presque toutes les gares du réseau, la taxe par tonne et kilomètre est de 3,75 centimes et la taxe d'expédition est de 1f,50 par tonne. Les huit autres tarifs d'exception ne contiennent que quelques prix fermes entre des gares dénommées.

Réseau de la direction royale de Breslau. — Il y a onze tarifs d'exception :

1° Bois (tarif spécial II);
2° Plomb en saumon, fils, feuilles et tuyaux en plomb ;
3° Zinc brut, zinc en feuilles;
4° Pierres brutes, pavés, etc.;
5° Articles de fer, d'acier de toutes sortes non compris dans les tarifs spéciaux II et III;
6° Fers et aciers façonnés, tôles, tuyaux, etc.;
7° Houille et coke ;
8° Minerais de fer;
9° Bois de mines ;
10° Fers brut ;
11° Lignite.

Ces divers tarifs d'exception ne renferment que des prix entre un certain nombre de gares dénommées.

Réseau de la Direction royale d'Erfurth. — Il y a neuf tarifs d'exception sur ce réseau :

1° Bois (tarif spécial II);
2° Céréales;
3° Pierres de construction;
4° Lignites;
5° Terres, sable, argile;
6° Gravier;
7° Sable pour verrerie;
8° Pierres;
9° Spath.

Le tarif d'exception 1 est applicable à presque toutes les gares et stations. La taxe par tonne kilométrique est de 3,75 centimes, la taxe d'expédition est de 1f,50 par tonne. Les autres tarifs d'exception ne renferment que quelques prix fermes.

Sur le *Réseau de la Direction royale d'Elberfeld*, il y a sept tarifs d'exception.

Dispositions spéciales concernant certains transports.

a. Matières explosibles.

Les matières inflammables (poudre, munitions, artifices, amorces, etc.) spécifiées au paragraphe 1 de l'annexe A du Règlement d'exploitation, sont tarifées à la double taxe des expéditions partielles ou des expéditions par wagon complet, mais au minimum pour un poids de 5.000 kilogrammes à la taxe de la classe A_1, par expédition.

Si les prescriptions réglementaires des transports des matières explosibles exigent des wagons de protection, et que l'expéditeur n'ait pas à expédier d'autres wagons

chargés qui puissent en faire office, il devra payer la taxe de deux wagons de protection. L'escorte nécessaire est transportée dans le fourgon au tarif des toucheurs.

b. Objets d'un volume exceptionnel.

Les objets qui, en raison de leur volume exceptionnel, ne peuvent pas être chargés dans un wagon couvert, sont transportés d'après les règles appliquées aux expéditions par wagon complet. Le minimum de la perception est calculé à raison de 10.000 kilogrammes par wagon utilisé, au tarif des expéditions partielles, pour la petite vitesse, et au tarif de la messagerie, pour les expéditions en grande vitesse.

Ces prescriptions ne s'appliquent pas aux rails, poutres, planches, échelles ou autres produits de grande dimension, en fer ou en bois.

c. Marchandises volumineuses.

Les marchandises volumineuses, c'est-à-dire celles dont le chargement exige beaucoup de place, et dont le poids spécifique est faible, seront tarifées à la taxe des expéditions partielles, avec augmentation de 50 p. 100 de leur poids. C'est ce poids réel, augmenté de moitié et arrondi, qui servira de base à la perception du prix de transport en grande et en petite vitesse, d'après le tarif de la classe des expéditions partielles.

Le poids minimum est fixé à 30 kilogrammes par expédition.

Les marchandises que le tarif allemand considère comme volumineuses sont dénommées ci-dessous dans la note (*).

(*) Arbres, arbustes, plantes et fleurs vivantes non emballées; lits et plumes pour lits; joncs; écorces brutes; cuves vides, non emboîtées les unes dans les autres, et d'au moins 4 hectolitres de capacité; boîtes à cigares vides; fûts et

d. Voitures, équipages.

Les voitures, à l'exception du matériel de chemin de fer, expédiées en petite vitesse, sont tarifées comme il suit :

1° Les voitures de toutes sortes ne pouvant pas être chargées dans des wagons couverts sont tarifées, lorsqu'elles sont vides, d'après le tarif spécial III et éventuellement à la classe A_2, et lorsqu'elles sont chargées, d'après le tarif par wagon complet qui s'applique aux articles chargés dans la voiture ;

2° Les voitures de toutes sortes, qui peuvent être chargées dans les wagons couverts, sont taxées comme marchandises volumineuses ;

3° Les voitures et wagonnets de transport et ceux à bascule, que la traction se fasse par locomotives, chevaux ou à bras d'homme, sont tarifés, lorsqu'ils sont chargés sur des wagons pour être transportés par chemin de fer, comme il est dit dans les alinéas 1° et 2° ci-

---

tonneaux, neufs et vides, excepté ceux en chêne cerclés de fer; lin brut; figures en plâtre ou en bois, non emballées; ballons en verre, vides, emballés (les ballons en verre non emballés ne sont acceptés qu'en wagon complet); foin; chaises en bois non démontées et ne pouvant être assemblées; houblon non pressé (le houblon est considéré comme pressé s'il est expédié en balles rondes et cylindriques d'au moins 100 kilogrammes l'une, ou en balles cubiques); chapeaux en feutre, en soie et en paille, non empaquetés en ballots; bateaux et nacelles; pots et vases neufs et vides; voitures d'enfants, trains de voitures d'enfants; caisses en bois, vides, neuves, non emboîtées; coffres neufs, non emboîtés; vannerie, telle que corbeilles vides, treillages en osier (y compris les paniers d'emballage neufs et meubles d'osier); liège ouvré, ouvrages en liège, bouchons de liège; meubles en bois courbé; rognures de papier, non en ballots ficelés; cardes à foulons et chardons de tisseurs; cannes et joncs pour sièges; roseaux; nattes et cordes en jonc ou en paille; herbes marines (varech, algues, alfa), non en paquets ficelés; cadres de canapés; paille hachée emballée; paille, y compris les pailles de lin, colza et riz; cercles en bois pour tonneaux et fûts; vélocipèdes; ouate; laine lavée, à moins qu'elle ne soit expédiée en balles cylindriques d'un poids minimum de 100 kilogrammes l'une, ou en balles cubiques.

dessus, et lorsqu'ils roulent sur leurs propres roues, comme matériel de chemin de fer;

4° Les voitures avec des panoramas, des carrousels, etc., ainsi que les traîneaux, les pompes à incendie, sont taxés comme des voitures non chargées. Les locomobiles, les machines à battre et à semer, sont tarifées comme le fer et l'acier au tarif spécial I;

Les animaux vivants isolés, chargés dans des voitures à panoramas, à carrousels, etc., ne sont pas taxés à part, mais tarifés comme tout le reste du contenu des voitures;

5° Les voitures, ainsi que les véhicules mentionnés à l'alinéa 4° ci-dessus, sont soumis aux prescriptions des alinéas 1° et 2°, alors même que l'on enlève le timon et les roues.

Matériel de chemin de fer. — Le prix du transport de locomotives ou tenders roulant sur leurs propres roues ou placés sur des trucs est de 3,75 centimes, par tonne et par kilomètre. Il est perçu, en outre, une taxe d'expédition de 1f,25 par tonne. Le poids des trucs et des pièces de rechange est taxé comme les locomotives et tenders. Le transport des trucs vides au retour a lieu gratuitement.

Les voitures, wagons et autres véhicules de chemin de fer roulant sur leurs propres roues, sont taxés à raison de 8,75 centimes par essieu et kilomètre, avec une taxe d'expédition de 2f,50 par essieu.

e. Emballages ayant servi.

1° Le transport des emballages désignés ci-après, lorsqu'ils ont servi, qu'ils sont vides et que le transport s'effectue en expédition partielle, est taxé sur base de la moitié du poids réel de l'expédition, mais au minimum d'après un poids de 20 kilogrammes : tonneaux de moins de 800 litres de capacité; baquets, cuves de moins de

400 litres de capacité; tonneaux et baquets métalliques, ainsi que cylindres en métal (pour le transport de l'alcool, de produits chimiques, d'huiles, vernis, houblon, etc.); bidons pour le transport du lait, portant la marque du propriétaire; caisses métalliques ou autres, cages, paniers, sacs; les couvertures ayant servi au transport de poudre et de munitions; tonneaux, caisses, paniers ayant servi et remplis de paille ou de foin d'emballage, en tant que le contenu peut être vérifié facilement.

2° Sont tarifés d'après leur poids intégral, tous les autres emballages vides, tels que bouteilles, bidons (autres que ceux dénommés ci-dessus), boîtes en ferblanc; cruches; toile d'emballage ayant servi; peaux servant à l'emballage; boîtes, coffres; de même les tonneaux, paniers, caisses contenant des bouteilles; bidons, cruches, boîtes, boites à cigares et qui sont vides; les armoires vides servant au transport des munitions.

3° Les ballons en verres ou en grès et les tonneaux d'une capacité supérieure à 800 litres et ayant servi, sont taxés à la classe des expéditions partielles et pour la moitié de leur poids, mais au minimum pour un poids de 1.000 kilogrammes par wagon utilisé, à moins que l'on n'obtienne une taxe inférieure en appliquant 1 fois 1/2 le tarif des expéditions partielles aux ballons vides ayant servi, et une fois ce tarif au poids réel des tonneaux en question.

4° Les emballages expédiés en grande vitesse ne jouissent pas de cette réduction de taxe, et sont soumis au tarif ordinaire de la messagerie.

Les emballages ayant servi, qui sont expédiés en grande ou en petite vitesse avec déclaration de la valeur, ou avec délais de livraison assurés, ne jouissent pas des faveurs ci-dessus, et sont transportés aux conditions du tarif ordinaire des expéditions partielles de grande ou de petite vitesse.

f. **Bois longs et autres articles de longueur exceptionnelle.**

Il est perçu une taxe de 0f,1875 par kilomètre pour chaque wagon tamponneur, nécessité pour le transport des articles, tels que bois longs, fers longs, échelles, etc. Les objets transportés ne doivent pas appuyer sur les wagons tamponneurs.

Si pour le chargement des bois et autres articles de longueur exceptionnelle, il est nécessaire d'employer plus d'un wagon, tous les wagons employés sont considérés comme également chargés, et la taxe sera calculée conformément aux conditions en vigueur.

Chargement et déchargement des marchandises.

Les marchandises expédiées en grande et en petite vitesse, aux conditions des tarifs des expéditions partielles, sont chargées et déchargées aux frais et par les soins de l'administration du chemin de fer. Toutefois, l'administration pourra exiger que le chargement et le déchargement des articles pesant isolément chacun plus de 750 kilogrammes, et de ceux dont les dimensions dépassent la capacité d'un wagon, soient opérés par l'expéditeur et par le destinataire.

Toutes les autres marchandises sont à charger et à décharger par les expéditionnaires et les destinataires, à moins que l'administration n'effectue elle-même ces manutentions, en percevant les taxes fixées à cet effet par son tarif local.

Dans ce dernier cas, si la manutention est faite par l'administration du chemin de fer, sur le désir formel de l'expéditeur ou du destinataire, les ouvriers qui effectuent le travail sont à considérer comme des agents de l'expéditeur ou du destinataire, et la responsabilité mentionnée

au paragraphe 63 du règlement d'exploitation n'existe pas. (Responsabilité du chemin de fer pour ses employés.)

Bâchage des marchandises.

L'administration du chemin de fer est autorisée à transporter, en wagons découverts, les articles des tarifs spéciaux, à l'exception de ceux désignés spécialement à cet effet, dans la nomenclature des marchandises des trois tarifs spéciaux. A défaut de prescription contraire de l'expéditeur sur la lettre de voiture demandant l'emploi de wagons couverts, l'administration ne sera pas responsable des avaries résultant de ce mode de transport. Si la lettre de voiture prescrit expressément l'emploi de wagons couverts pour le chargement des articles en question, on majorera les taxes à appliquer de 10 p. 100.

Les administrations de chemins de fer sont obligées de transporter, en wagon couvert et sans augmentation des taxes, un certain nombre de marchandises dont nous donnons la nomenclature dans la note ci-dessous (*).

(*) Alun; coton brut et déchets de coton, déchets de filés de coton et de twiste; déchets en général; noir d'os, noir animal, charbon d'os, spodium; literie et plumes à lit; tableaux encadrés et cadres; alfa; cendres; sel amer; tôles de fer (noires, étamées, fer-blanc) et tôles de zinc; chaux, gypse en poudre, chlorure de chaux; écorces brutes ou moulues (tan); ciment; cellulose; crin d'Afrique; chlorures de baryum; chlorures de magnésium; chlorure de zinc; racines de chicorée torréfiées; boîtes à cigares vides; engrais, savoir : sulfure d'ammoniaque, cendres, sang pulvérisé, salpêtre du Chili, engrais de poisson et de viande pulvérisés, guano, plâtre calciné, farine de cornes, potasse, sels servant comme engrais, cendre d'os, magnésie, poudrette, noir pour engrais, phosphates, poussière de laine; glace (eau congelée); fer et acier ouvrés de toute espèce y compris notamment les tuyaux de poêle, le fil de fer, les clous de fil de fer, les armes, la coutellerie, les fontes moulées fines, telles que poêles, croix moulées pour tombes, fer feuillard, tôle d'acier, acier en paquets, tonneaux et caisses; sulfate de fer (vitriol vert); terre à porcelaine; bois de teinture, moulu et effilé; figures en plâtre et en bois non emballées; lin; céréales, comprenant : froment, seigle, orge, avoine, maïs, sar-

Les prescriptions suivantes doivent être observées en ce qui concerne les bâches que les expéditeurs fournissent eux-mêmes pour couvrir les marchandises :

1° Les bâches porteront l'indication nette et durable du nom et du domicile (station de chemin de fer) du propriétaire.

2° Les bâches particulières des expéditeurs servant à couvrir les chargements sont transportées franches de port, tant à l'aller et au retour, lorsque le renvoi a lieu, en petite vitesse, avant l'écoulement d'un délai de trois mois.

3° Les bâches particulières sont livrées dans la station de destination au destinataire de l'expédition; à cet effet, l'expéditeur et la gare expéditrice doivent indiquer sur les lettres de voiture et les feuilles de route accompagnant les transports en question, la mention suivante : « Avec..... bâches particulières servant à couvrir les chargements ».

---

rasin, millet, légumes secs et graines oléagineuses; son, semoule, graines fourragères; glucose; terre à graphite; chanvre; harengs; mobiliers et ustensiles de ménage; sciure de bois, pâte de bois; houblon; jute et déchets de filés de jute; farine sèche de pommes de terre et pommes de terre; choux; pierres lithographiques; craie brute, moulue, en morceaux et craie lavée; chaux vive; tan et mottes de tan; magnésie; kaolin; noir animal; malt, drèches; ustensiles de ménage; pièces de machines en fer et en acier; meubles en bois courbé; blé égrugé; tourteaux et farines de tourteaux de toute espèce, y compris tourteaux de lin et farines de lin; orseille; crin d'Afrique; papier d'emballage de toute nature, papier d'emballage de paille, sacs et cornets en papier, en paquets et en ballots; rognures et déchets de papiers emballés ou solidement liés; potasse; cardes et chardons; riz et son de riz, poudre de riz, farines de riz; betteraves torréfiées ou séchées et betteraves coupées; sel et sel comestible, déchets de sel, sel pour bestiaux et sel de Glauber; sulfate de baryte; herbes marines; lessives caustiques, savons; soude brute, calcinée (cendre de soude) et cristallisée; feldspath; chlorure de zinc; acier, fil d'acier, articles d'acier; balles et paille hachée; amidons de toute espèce; pâte de paille; papier de paille et carton de paille; glucose; sucre de fécule, sirops de glucose et de sucre de fécule; étoupe; déchets d'étoupe de toute espèce, filasses de coton et déchets de fil; laines de toute espèce et déchets de laine; sucre brut et raffiné et sucre de toute espèce destiné à l'exportation; oignons comestibles.

4° Lors du renvoi des bâches, le destinataire doit justifier de l'envoi de ces bâches en présentant la lettre de voiture originale de l'envoi, sur laquelle la gare constatera le renvoi régulier par l'apposition d'un timbre. Les bâches à renvoyer sont accompagnées d'une lettre de voiture adressée au propriétaire des bâches, portant la mention expresse :

« A transporter franches de port. »

A défaut de cette mention, et à défaut de la présentation de la lettre de voiture originale de l'envoi au moment de l'expédition des bâches à retourner, on applique le tarif ordinaire à ces transports.

5° L'administration du chemin de fer ne garantit pas de restituer les bâches sans avaries, ni dans les délais ordinaires de livraison. Pour s'assurer, au moment du transport en retour, une indemnité en cas d'avarie, de perte et d'inobservation des délais de livraison, les bâches sont à expédier comme marchandise de petite vitesse.

Si l'expéditeur, au lieu de fournir des bâches particulières, demande par écrit, dans la lettre de voiture, à louer des bâches de l'administration, il payera, dans le cas où l'administration aura des bâches disponibles, les frais de location fixés au tarif pour frais accessoires, à savoir :

2f,50 par fraction indivisible de parcours de 200 kilomètres pour chacune des bâches demandées par l'expéditeur dans la lettre de voiture.

Si plusieurs bâches sont nécessaires pour couvrir le chargement d'un wagon à deux essieux, la taxe n'est perçue que pour une seule bâche.

La taxe de location de bâches est à payer par l'expéditeur sans qu'il ait demandé des bâches à l'administration du chemin de fer, lorsque les règlements de douane ou de la police du chemin de fer prescrivent l'emploi de bâches.

Transport des chevaux, bestiaux, poissons.

Chevaux. — Le transport de chevaux dans des wagons-écuries est effectué aux conditions suivantes :

Il est perçu pour	1 cheval. . .	0f,375	par kilomètre
—	2 chevaux. .	0 ,50	—
—	3 — . .	0 ,625	—

Il est perçu pour chaque cheval en sus, 0f,125 par kilomètre.

La taxe d'expédition s'élève à 1f,25 par cheval.

Le minimum de la perception est de 3f,75 par cheval.

Les taxes de transport sont réduites de 1/3 pour les chevaux de course se rendant au lieu de course ou en revenant, et aux juments de sang et à leurs poulains, lorsqu'elles reviennent des haras ou qu'elles s'y rendent.

Les hommes qui accompagnent ces chevaux de courses et juments de sang, lorsqu'ils se trouvent avec les chevaux dans les wagons-écuries, paient une taxe de transport de 2,5 centimes, par personne et par kilomètre.

Bestiaux par wagons complets. — Le transport des bestiaux par wagon complet est tarifé d'après la surface du plancher du wagon qui sert au transport (*).

Il est perçu, par mètre carré de surface de plancher et par kilomètre, sans distinguer si le transport s'effectue en wagons couverts ou en wagons découverts.

Pour les chevaux. . . . . 3,125 centimes.

La taxe d'expédition à payer s'élève à 0f,50 par mètre carré de surface de plancher.

Pour tout autre bétail. . . . . 2,5 centimes.

(*) Ce système de calcul de la taxe de transport des bestiaux diffère radicalement de celui usité sur le réseau d'État, en Autriche (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1884, 2e sem.). Sur le réseau autrichien, en effet, le bétail est tarifé d'après un poids normal moyen, fixé par l'expérience, pour chaque catégorie de bétail.

La taxe d'expédition s'élève à $0^f,50$ par mètre carré.

Lorsque le wagon est à deux étages et sert au transport de petit bétail, la taxe par mètre carré est de 3,375 centimes. La taxe d'expédition s'élève à $0^f,50$ par mètre carré.

Lorsque des chevaux et d'autres bestiaux sont chargés dans un même wagon, on applique le tarif pour les chevaux.

L'expéditeur peut charger dans un même wagon autant de bétail qu'il peut en mettre sans dépasser la capacité de chargement du wagon, et sans qu'il y ait danger pour la sécurité de l'exploitation, ni tourment pour le bétail, ce dont le chef de gare sera juge.

Si une expédition ne comprend que quelques têtes de bétail, et si elle occupe une surface de plancher inférieure ou au plus égale à la moitié de la surface du plancher du wagon utilisé, il ne sera perçu que la moitié de la taxe à payer pour le wagon complet; si la surface occupée est supérieure à la moitié du plancher du wagon, on payera la taxe pour le wagon complet.

Une demi-charge de wagon pourra se composer de :

3 chevaux ou poneys;
3 bœufs;
4 vaches;
5 ânes, mulets ou poulains;
12 porcs;
20 veaux ou chèvres;
30 moutons ou agneaux;
40 petits porcs ou autres petits animaux.

Il est perçu pour le transport d'une seule pièce de bétail *d'élevage*, le tiers du prix d'un wagon complet de bétail.

La nourriture nécessaire au bétail pendant le transport est transportée gratuitement dans les wagons à bestiaux ou dans les coffres à nourriture. L'excédent de

nourriture qui restera à la gare destinataire, et qui n'aura pas été employé pendant le transport, pourra être taxé d'après les tarifs et pour tout le parcours.

Si l'expéditeur demande que le transport de son bétail soit effectué par un train qui n'est pas destiné au transport de wagons de bétail, et si l'administration du chemin de fer y consent, la taxe à percevoir sera majorée de 50 p. 100.

Le chargement et le déchargement des animaux vivants sont effectués respectivement par l'expéditeur et par le destinataire.

Poissons. — Les poissons frais, les poissons vivants en baquets ou tonneaux, ainsi que les petits animaux aquatiques ou marins destinés aux aquariums, le frai, expédiés en petite vitesse, sont transportés par les trains de voyageurs affectés à ce service, ou par des trains de messageries. Si l'expédition est faite en grande vitesse, ces articles sont transportés par trains express et postes, à moins que, par des considérations d'exploitation, le transport n'en puisse pas être effectué par ces trains. Ce tarif de faveur n'est accordé que lorsque les poissons vivants sont contenus dans des tonneaux jaugés officiellement; c'est le volume indiqué par le timbre de jauge qui sert de base au calcul de la taxe, chaque litre de jauge, utilisé ou non pour le transport, est compté pour un kilogramme.

Par exception, néanmoins, on transportera, sous les conditions qui viennent d'être indiquées, les poissons contenus dans des boîtes en fer-blanc non jaugées, en prenant le poids brut effectif de ces boîtes, à la condition que le poids de chaque boîte ne dépasse pas 25 kilogrammes.

Délais de livraison.

Les délais de livraison des marchandises en petite vitesse sont calculés comme il suit :

Délai d'expédition		2 jours	
Délai de transport.	Pour les parcours inférieurs à 100 kilomètres	1 —	
	Pour les parcours au delà de 100 kilomètres	1 —	par fraction indivisible de 200 kilomètres.

Déclaration de la valeur des marchandises. — Déclaration d'intérêt à la livraison.

Il y a dans les tarifs allemands deux dispositions spéciales relatives à la responsabilité du chemin de fer, d'une part, en cas de perte ou d'avarie partielle de la marchandise, et, d'autre part, en cas de retard dans la livraison. Ces deux dispositions existent dans tous les tarifs de petite et de grande vitesse en vigueur en Autriche-Hongrie et en Allemagne. Nous les avons déjà signalées dans notre étude sur les tarifs des chemins de fer de l'État en Autriche. Le principe qui régit la responsabilité des chemins de fer allemands et autrichiens est différent de celui que les dispositions du Code civil français combinées à celles du Code de commerce imposent aux administrations de chemins de fer en France. Sans nous arrêter aux considérations juridiques, nous indiquerons simplement comment est calculée l'indemnité en Allemagne, et comment, à l'aide d'assurances spéciales, l'expéditeur peut obtenir des indemnités supérieures aux indemnités normales prévues par les paragraphes 68 et 70 du règlement d'exploitation allemand.

D'après ce règlement, en cas de perte partielle ou totale de la marchandise, la base prise pour l'évaluation de l'indemnité est la valeur commerciale de la marchan-

dise perdue ou avariée; dans aucun cas, l'indemnité ne pourra être supérieure à 75 francs par 50 kilogrammes de poids brut.

Si l'expéditeur, en cas de perte ou d'avarie de sa marchandise, veut avoir une indemnité supérieure à l'indemnité normale de 75 francs par 50 kilogrammes, il est obligé de déclarer la valeur de la marchandise sur la lettre de voiture.

La valeur ainsi déclarée est le maximum de l'indemnité à laquelle l'expéditeur a droit. Mais l'expéditeur est obligé de payer alors, outre la taxe de transport, une surtaxe d'assurance de la valeur, de 1 dixième p. 1000 de la valeur déclarée, par fraction indivisible de parcours de 150 kilomètres, avec un minimum de perception de 12,5 centimes. Cette surtaxe d'assurance est la même pour la grande et pour la petite vitesse. Pour les voitures, équipages et bestiaux, elle s'élève également à 1 p. 1000, par fraction indivisible de 150 kilomètres de parcours, avec un minimum de perception de 12,5 centimes.

Les administrations des chemins de fer allemands sont responsables des dommages causés par les retards dans la livraison des marchandises. Le règlement d'exploitation allemand fixe comme il suit l'indemnité normale en cas de retards dans la livraison (§ 70 du règlement) :

1° *Messagerie.* — Si le retard est supérieur à douze heures et inférieur à vingt-quatre heures, l'administration du chemin de fer rembourse le quart du prix de transport; si le retard varie de un à trois jours, elle rembourse un tiers de ce prix, et, si le retard est supérieur à trois jours, elle rembourse la moitié du prix de transport.

2° *Petite vitesse.* — En cas de retard supérieur à un jour et inférieur à trois jours, on rembourse à l'expéditeur le quart du prix de transport; un retard de trois à

huit jours donne droit au remboursement du tiers du prix de transport, et, en cas de retard supérieur à huit jours, on restitue la moitié du prix du transport.

Les indemnités ci-dessus mentionnées en cas de retard dans la livraison sont accordées à l'ayant-droit, sans que ce dernier ait besoin de faire la preuve qu'il y a eu réellement dommage pour lui.

Si l'expéditeur veut avoir une indemnité supérieure à l'indemnité normale, il est obligé de faire la preuve du dommage réellement causé.

L'expéditeur peut faire, sur la lettre de voiture, la déclaration de l'intérêt à la livraison et indiquer la somme qui représenterait, selon lui, le dommage causé par le retard dans la livraison. Cette somme est alors le maximum de l'indemnité qu'il puisse demander. Mais, dans ce cas, l'expéditeur est obligé d'acquitter, en sus de la taxe de transport, une surtaxe d'assurance calculée pour les marchandises de grande et de petite vitesse, comme il suit :

Par fraction indivisible de 12f,50 de la somme déclarée, il est perçu :

		centimes.
Sur les	150 premiers kilomètres. . . .	1,25
—	225 kilomètres suivants. . . .	0,625
—	375 —	0,625

CHAPITRE III.

ANALYSE CRITIQUE DU SYSTÈME DES TARIFS DE VOYAGEURS.

Les tarifs des voyageurs des chemins de fer de l'État en Allemagne contiennent deux groupes de taxes : celles applicables aux trains de voyageurs ordinaires (trains

omnibus), et celles perçues lorsque le transport s'effectue par trains express.

Les taxes des trains express ou rapides prussiens sont supérieures à celles des trains omnibus, et cela de 12,5 p. 100 en Ire classe, de 11,5 p. 100 en IIe classe, et de 17,5 p. 100 en IIIe classe (Bromberg).

Certains trains rapides seulement du réseau d'État de Prusse contiennent des voitures de IIIe classe. Mais tous les trains express et rapides transportent des voyageurs de IIe classe en provenance et à destination de l'une quelconque des gares ou stations où s'arrête le train express.

Sur quelques réseaux d'État, les trains express ne renferment pas de voitures de IIIe classe; il est vrai que le nombre de ces réseaux tend à diminuer.

Les taxes par voyageur et par kilomètre ne sont pas uniformes sur tous les réseaux d'État. Ainsi, on a vu plus haut que, dans les réseaux d'État de Prusse, les taxes par voyageur et kilomètre, en train omnibus pour les Ire, IIe et IIIe classes, s'élevaient respectivement à 10 centimes, 7,5 centimes et 5 centimes; sur le réseau d'Alsace-Lorraine, au contraire, ces taxes sont de 10 centimes, 6,625 centimes et 4,25 centimes. De même, la surtaxe d'express en Alsace-Lorraine s'élève à environ 14 p. 100 en Ire classe, et à 20 p. 100 en IIe classe.

Il résulte de ce qui précède que, sur tous les réseaux de l'État en Allemagne, la vitesse des trains qui effectuent le transport des voyageurs est un élément important dans la fixation de la taxe à payer par le voyageur.

L'étude des tarifs de voyageurs appliqués dans les divers pays de l'Europe montre que ce principe de la majoration de la taxe à acquitter par les voyageurs, lorsque la vitesse des trains qui transportent ces voyageurs augmente, principe fort logique du reste, est appliquée sur

la majeure partie des réseaux de l'Europe, que ces réseaux soient ou non exploités par l'État.

Le tarif des voyageurs des réseaux d'État de Prusse contient une IVe classe dont la taxe est fort réduite et s'élève à 2,5 centimes par voyageur kilométrique. En principe, les voyageurs de IVe classe doivent rester debout.

Une faveur particulière est accordée aux voyageurs de la IVe classe : le poids de bagages, outils, paniers, etc., que ces voyageurs ont le droit d'emporter gratuitement avec eux, peut atteindre 35 kilogrammes, tandis que dans les trois autres classes, les bagages à la main emportés par les voyageurs dans les voitures doivent être petits, facilement transportables, et ne pas gêner les autres voyageurs. Les wagons de IVe classe sont utilisés surtout par les ouvriers se rendant au travail avec leurs outils et par les paysans allant au marché pour vendre leurs produits qu'ils emportent avec eux. Il est certain que l'existence de cette IVe classe favorise beaucoup le déplacement des ouvriers et des paysans, et permet au petit producteur d'aller vendre sans intermédiaire ses produits sur le marché le plus voisin.

Les tarifs de voyageurs des chemins de fer allemands donnent toute facilité aux voyageurs de Ire, IIe, et même de IIIe classe des trains omnibus, de passer en cours de route dans la même classe ou dans une classe supérieure d'un train express, en payant une surtaxe qui, sur les chemins d'État de Prusse, lorsque le voyageur ne change pas de classe, est égale au prix de la IVe classe, soit 2,50 centimes par kilomètre, et sur les chemins de fer d'Alsace-Lorraine, n'est que de 1,375 centimes par kilomètre, quelle que soit, du reste, la classe dans laquelle se trouve le voyageur. Cette surtaxe est la même, en valeur absolue, pour toutes les classes ; sa valeur relative par rapport au prix des places en Ire et en IIe classes, est de 25 p. 100 en Ire classe, et de 33 p. 100 en IIe classe.

Il y a donc, comme on le voit, une différence assez sensible sur le réseau de l'État de Prusse, entre la surtaxe d'un billet d'express et la surtaxe à payer par un voyageur en cours de route qui passe d'un train omnibus dans un train express.

Ce système des billets de surtaxe d'express qu'on peut prendre en cours de route est très commode pour les voyageurs et fort apprécié par eux ; il leur permet, à un moment quelconque de leur voyage, de se servir d'un train express en prenant un billet de surtaxe d'express.

Le voyageur allemand a du reste la faculté, pendant le cours de son voyage, de descendre dans une station intermédiaire quelconque, et d'en repartir le même jour ou dans la journée du lendemain, à la condition de faire mettre sur son billet la mention de l'interruption par le chef de la gare où le voyageur a interrompu son voyage.

L'usage des trains express par les voyageurs de IIe classe n'est pas subordonné à un parcours minimum déterminé à effectuer par ces voyageurs. L'admission des voyageurs de IIe classe, dans les express, n'est pas limitée non plus aux voyageurs en provenance et en destination de gares spécifiées. Tout voyageur de IIe classe peut utiliser un train express entre deux gares quelconques dans lesquelles cet express s'arrête (*).

La réduction que présente le prix d'un billet d'aller et retour, par rapport au double prix d'un billet simple, est uniformément de 25 p. 100, sur les chemins de fer d'État en Prusse.

Sur le réseau d'Alsace-Lorraine, la réduction est différente : avec un billet de Ire classe, qui est timbré *ad hoc* au moment de sa délivrance par la gare expéditrice, on

(*) Il n'y a que certains trains de luxe qui ne transportent pas de voyageurs de IIe classe (Orient-express).

peut voyager, aller et retour, en IIe classe; de même, avec un billet de IIe classe, on peut effectuer un voyage aller et retour en IIIe classe; pour l'aller et le retour en Ire classe (omnibus), il faut prendre un billet de Ire et de IIIe classe (omnibus). Par suite, les réductions qui en résultent pour un voyage aller et retour en Ire, IIe ou IIIe classe, sont respectivement de 28,7, 24,5 et 24,5 p. 100. Ce système de billets d'aller et retour dispense l'administration du réseau d'Alsace-Lorraine d'avoir des types de billets spéciaux pour les voyages d'aller et retour.

Les billets d'aller et retour sont délivrés par toutes les gares et stations du réseau, sans condition de parcours, et aussi bien pour les trains omnibus que pour les trains express.

Les observations qui précèdent montrent que le régime du transport des voyageurs, en Allemagne, diffère de celui du transport des voyageurs en France, et que quelques-unes des dispositions des tarifs de voyageurs allemands sont plus favorables au public que les dispositions correspondantes des tarifs de voyageurs français. L'existence d'une surtaxe d'express sur tout le réseau allemand justifie, du reste, une partie des différences qui existent dans les dispositions des tarifs de voyageurs en Allemagne et en France.

Les règles du tarif allemand sur le transport des bagages sont, au contraire, moins favorables pour les voyageurs emportant des bagages avec eux que les règles correspondantes des tarifs français. La franchise des bagages est, en France, de 30 kilogrammes; sur le réseau d'État de Prusse, elle n'est que de 25 kilogrammes, et encore il n'y a que certaines catégories de voyageurs qui aient droit à cette franchise. Les voyageurs porteurs de billets simples d'une des trois premières classes de voitures, et les voyageurs munis de billets circulaires de

IIe et de IIIe classe, valables pendant six semaines, ont seuls droit à cette franchise de bagages de 25 kilogrammes. Toutes les autres catégories de voyageurs, tels que ceux porteurs d'un billet d'aller et retour, les abonnés, ne peuvent pas jouir de cette franchise de 25 kilogrammes.

Sur certains réseaux d'État allemand, il n'existe même aucune franchise pour le transport des bagages. Ainsi, sur le réseau d'empire d'Alsace-Lorraine, il n'y a pas de franchise, et tous les bagages à la main, que le voyageur n'emporte pas avec lui dans son compartiment, sont taxés au tarif des bagages et pour leur poids intégral.

Le tarif des bagages des chemins de fer d'État de Prusse contient encore une autre clause restrictive en ce qui concerne la définition du mot *bagages*. Ce tarif ne considère comme bagages que les effets appartenant au voyageur et qu'il emporte avec lui. Les caisses ou tonneaux contenant des marchandises, ainsi que tout autre objet ne servant pas aux besoins du voyageur, ne sont pas considérés comme bagages et ne jouissent pas de la franchise de 25 kilogrammes.

Les tarifs des bagages de tous les chemins de fer allemands renferment des taxes spéciales que l'administration du chemin de fer est autorisée à percevoir lorsque le voyageur assure ses bagages ou lorsqu'il déclare qu'il y a intérêt à la livraison. Quand il y a eu assurance, la responsabilité pécuniaire du chemin de fer, en cas de perte ou d'avarie des bagages ou en cas de retard dans la livraison, est autre que lorsqu'il n'y a pas eu d'assurance faite par l'expéditeur. Nous renvoyons à ce qui a été dit plus haut sur cette question de responsabilité des administrations de chemins de fer, lorsque nous avons exposé le système des tarifs de transport des marchandises en vigueur sur les chemins de fer de l'État en Allemagne.

Recettes et parcours des voyageurs.
Tarifs moyens perçus.

Les parcours kilométriques des voyageurs des diverses classes se répartissent, en Allemagne, comme il suit, pour l'année 1884:

Ire classe	2,2 p. 100
IIe —	17,8 —
IIIe —	50,5 —
VIe —	23,6 —
Prix réduits	5,9 —
Total	100,0

Le nombre moyen des voyageurs transportés par kilomètre du réseau s'est élevé, sur les 35.569 kilomètres de longueur moyenne du réseau allemand exploitée en 1884 :

Ire classe	4.679 voyageurs.
IIe —	37.799 —
IIIe —	107.172 —
IVe —	49.994 —
Prix réduits	12.567 —
Total	212.211 voyageurs.

La IVe classe représente, comme trafic kilométrique, un peu moins de la moitié du trafic de la IIIe classe.

Quant à la recette moyenne du trafic des voyageurs par kilomètre de réseau, elle atteint 9.137f,50, se répartissant dans la proportion suivante entre les diverses classes de voyageurs.

CLASSES DES VOYAGEURS	RECETTE MOYENNE par kilomètre de réseau	PROPORTION p. 100	TARIF MOYEN perçu
	francs		centimes
Ire classe............	483,75	5,3	10,33
IIe —	2.602,50	28,5	6,89
IIIe —	4.403,75	48,2	4,11
IVe —	1.318,75	14,4	2,63
Prix réduits..........	328,75	3,6	1,98
Total ou moyenne...	9.137,50	100,0	4,28

La recette moyenne du trafic des voyageurs s'élève, en 1884, sur l'ensemble du réseau allemand, à 9.137f,50.

La recette de la IIIe classe représente presque la moitié de la recette totale des voyageurs. Le tarif moyen perçu pour les voyageurs, en 1884, s'est élevé à 4,28 centimes. Il avait été, en 1882, de 4,352 centimes, et, en 1883, de 4,326 centimes. Ce tarif moyen va donc légèrement en diminuant.

CHAPITRE IV.

ANALYSE CRITIQUE DES TARIFS DE MARCHANDISES.

Considérations générales.

Afin de bien faire saisir la portée économique des tarifs des marchandises en vigueur en Allemagne, et de rendre compte des principes qui ont guidé les créateurs du système allemand actuel des tarifs de petite vitesse, il est utile de faire précéder cette étude critique de quelques considérations d'ordre général.

Examinons les différents transports et manutentions auxquels une marchandise est soumise depuis l'instant où elle est prise au domicile ou dans les magasins de

l'expéditeur jusqu'au moment où elle est reçue au domicile ou dans les magasins du destinataire.

Il y a d'abord le camionnage, des magasins de l'expéditeur jusqu'à la gare du chemin de fer; puis viennent les manutentions au départ, déchargement à quai, pesage, magasinage et chargement dans un wagon. Il y a ensuite le transport proprement dit par chemin de fer. Dans la gare de destination, il y a de nouveau des manutentions inverses des précédentes : déchargement du wagon, magasinage, chargement sur un camion, et enfin transport de la marchandise par camion, de la gare d'arrivée jusqu'aux magasins ou au domicile du destinataire.

On conçoit que l'administration d'un chemin de fer, en dehors du transport proprement dit de la marchandise sur ses rails, se charge, suivant la nature des marchandises, de tout ou partie des manutentions et camionnages que nous venons d'énumérer. C'est ce qui a lieu en Angleterre, et c'est ce qui se produit, quoiqu'à un degré moindre, sur le réseau français. Mais on comprend également que le rôle du chemin de fer se borne à celui de transporteur pur et simple sur ses rails, n'ayant à faire aucune manutention de la marchandise et, en échange, le tarif qu'on paiera ne doit indemniser l'administration du chemin de fer que de l'utilisation de son matériel, de sa voie, de ses machines et de son personnel. C'est le contrepied du système anglais, dans lequel l'administration du chemin de fer garde la marchandise entre les mains, depuis l'instant où elle quitte le domicile de l'expéditeur, jusqu'à celui où elle est remise au destinataire en son domicile (*). L'étendue maxima du rôle des che-

(*) Les cinq classes de *marchandises générales* des tarifs anglais ne comprennent que des articles dont le transport est effectué par la Compagnie anglaise depuis le domicile de l'expéditeur jusqu'à celui du destinataire. Il n'en est pas de même du transport des articles de la *classe minérale* et de a *classe spéciale*.

mins est celle du rôle des compagnies en Angleterre; le rôle minimum se réduit à celui de simple tractionnaire louant son matériel roulant et sa voie. L'ancien système des tarifs d'Alsace-Lorraine, et, après lui, le système actuel des tarifs allemands, quoiqu'à un degré moindre, marquent un pas vers ce rôle minimum et forment une première étape dans la voie de la diminution du champ d'action des administrations de chemins de fer.

Quelles seraient les conséquences de l'adoption et de la mise en pratique du rôle minimum par une administration de chemins de fer?

Si le chemin de fer n'est plus que transporteur, s'il ne s'occupe plus de la manutention, si l'expéditeur se substitue à lui pour le chargement de la marchandise dans la gare expéditrice, si le destinataire, de son côté, fait le déchargement de la marchandise à l'arrivée, la tâche du chemin de fer se trouve simplifiée beaucoup; il n'a plus besoin de bâtiments et de quais pour emmagasiner les marchandises qui lui sont remises, pour les peser, les charger en wagon dans la gare expéditrice, et pour les recevoir à l'arrivée jusqu'au moment où le destinataire vient les prendre; il n'a plus besoin du personnel nécessaire à cette manutention de la marchandise, il se contente de louer ses wagons au commerce et à l'industrie. Les dépenses de premier établissement sont diminuées, car il ne faut plus de halles à marchandises; les dépenses d'exploitation deviennent plus faibles, car on n'a plus à payer de frais de manutention.

Il y avait en Allemagne, au moment de la réforme des tarifs de petite vitesse, en 1877, une certaine partie de l'opinion publique qui préconisait ce système du rôle minimum attribué au chemin de fer; elle apercevait, à l'aide de ce système, la possibilité d'établir la concurrence, sur une seule et même ligne ferrée, entre les commissionnaires de transport et les groupeurs qui se serviraient du

chemin de fer, et auxquels ce dernier louerait ses wagons. Dans ce système, la compagnie du chemin de fer n'aurait plus été que *tractionnaire;* elle aurait perçu, en effet, dans ce cas, une taxe par wagon qu'elle louerait, et par kilomètre, quel que soit le poids du chargement mis dans ce wagon; elle serait étrangère à la concurrence que les expéditeurs se feraient entre eux sur son réseau. Un intermédiaire s'établirait alors, en règle générale, entre celui qui veut expédier la marchandise et celui à qui elle est destinée, intermédiaire qui réunirait, grouperait les produits afin d'obtenir des chargements complets de wagon, lui permettant d'utiliser, aussi bien qu'il le pourra, la capacité du wagon qu'il a loué.

Dans la pratique, l'ancien système d'Alsace-Lorraine et le tarif allemand actuel sont les seuls qui se rapprochent du système théorique esquissé plus haut, sans être pourtant aussi radicaux que lui; ils ont emprunté à ce système quelques-unes seulement de ses conséquences, et ils ne présentent, par suite, qu'une partie des avantages et des inconvénients du système absolu du *tarif au wagon*.

Classes et taxes kilométriques du tarif allemand.

Il n'y a qu'une seule classe d'expéditions partielles, quelle que soit la valeur de la marchandise. Ainsi, une expédition isolée de 500 kilogrammes, par exemple, d'étoffe de soie ou d'ivoire, est taxée au même prix qu'une expédition de 500 kilogrammes de toile ordinaire ou de toile d'emballage. Il n'existe plus de classification des articles basée sur la valeur des marchandises transportées, sauf pour les trois tarifs spéciaux qui font partie intégrante du tarif général allemand (*). Le seul élément

(*) Les trois tarifs spéciaux du tarif général allemand sont à proprement

qui influe sur la hauteur de la taxe kilométrique à percevoir est le poids de l'expédition; on applique les taxes de la classe A_1 aux expéditions en poids de 5 tonnes, et les prix de la classe B aux expéditions par wagon complet de 10 tonnes.

Dans le système actuel des tarifs allemands, les réductions de taxes sont très considérables lorsque les marchandises sont remises par wagon complet d'au moins 5 tonnes, et les prix de transport sont très bas pour les expéditions par wagons complets, quels que soient la nature et le poids de la marchandise transportée.

On peut donc dire que les deux points essentiels et caractéristiques du tarif allemand actuel de petite vitesse sont: d'une part, le pied de la parfaite égalité sur lequel il met toutes les marchandises (sauf celles de trois tarifs spéciaux) en matière de transport par chemin de fer, sans tenir aucun compte de leur valeur commerciale; et, d'autre part, les taxes très réduites qu'il accorde aux transports de marchandises par wagon complet d'au moins 5 ou 10 tonnes.

L'étude de tout système de tarifs présente deux faces, car toute question de tarif touche à deux intérêts différents: l'intérêt du commerce, de l'industrie, en un mot, du public, et l'intérêt des administrations de chemins de fer (compagnies ou États). Quels avantages et quels inconvénients le système actuel des tarifs allemands offre-t-il au public et aux administrations? Donne-t-il satisfaction aux exigences légitimes du commerce et de l'industrie sans léser les intérêts des administrations de

parler des classes générales de marchandises par wagon complet de 10 tonnes. et à taxe réduite. Ces tarifs spéciaux n'ont rien de commun avec les tarifs spéciaux français. Ces derniers correspondent, dans les tarifs allemands, aux tarifs d'exception qui varient d'un réseau à l'autre, suivant la nature particulière du trafic de chaque réseau.

chemins de fer? C'est ce que nous allons examiner au double point de vue du public et de l'administration du chemin de fer.

Avantages et inconvénients pour le public.

Les avantages incontestables du système actuel des tarifs allemands pour le public sont sa grande simplicité, et les taxes peu élevées qu'il fixe pour toutes les marchandises par wagon complet. Il n'y a plus de classification compliquée basée sur la valeur et la nature de la marchandise, il n'y a que trois tarifs spéciaux pour lesquels il existe une classification de marchandises. La simplicité du système permet à tout commerçant de se rendre immédiatement compte du prix de transport de ses produits. C'est là un avantage sérieux.

L'abaissement des taxes qui résulte du tarif allemand pour les expéditions par wagon complet est considérable. Ce tarif favorise les expéditions d'objets ou de marchandises de prix, puisque la taxe perçue est indépendante de la valeur de la marchandise, et que la rapidité du transport et le poids de la marchandise servent seuls de base à la taxation.

La faible taxe du tarif au wagon n'est accordée qu'aux expéditions de 5 tonnes au moins; elle descend, pour certains produits, remis en chargement complet de wagon, à 2,75 centimes, par tonne et par kilomètre (tarif spécial n° III); plus le poids de la marchandise est considérable, plus la taxe payée est faible. Il est facile aux grands industriels, aux grands négociants, d'expédier leurs produits en poids de 5 ou de 10 tonnes, et de bénéficier de l'application des taxes faibles du tarif au wagon.

Mais la petite industrie et le petit commerce ne peuvent pas en profiter; leurs expéditions quotidiennes ne se composent que de quelques colis et n'atteignent que ra-

rement le poids d'une tonne. Il eût fallu garder les marchandises pendant quelques jours et les accumuler dans les magasins afin d'atteindre la charge fixée pour l'application du tarif au wagon. Ce système de tarifs force le petit expéditeur à recourir à un intermédiaire qui réunit et qui groupe les expéditions du petit commerce, de la petite industrie. Il y a donc là un rouage de plus, le groupeur, et un travail nouveau, celui du groupeur.

La première conséquence de l'application du tarif allemand a été de livrer presque partout aux mains d'intermédiaires, de groupeurs, de camionneurs, toute l'expédition des colis isolés. Ces groupeurs réunissent dans leurs magasins ou dans ceux du chemin de fer, les marchandises des petits producteurs, et ne les expédient qu'en charge de wagon. Les grands négociants qui, avant la mise en vigueur du tarif actuel, avaient l'habitude de mener régulièrement à la gare leurs produits en wagon complet, n'ont pas eu besoin de ces intermédiaires ; ils ont continué à conduire eux-mêmes leurs marchandises à la gare, et ils bénéficient ainsi de la différence entre la taxe des expéditions partielles et la taxe réduite accordée aux marchandises par wagon complet ; le petit commerce, au contraire, ne peut profiter que d'une fraction de cette différence, le groupeur prenant pour lui la majeure partie de la différence. Le système des tarifs allemands se trouve, par ce fait, favoriser la grande industrie plus que la petite industrie et le petit commerce.

Une inégalité en matière de prix des transport a, croyons-nous, existé de tout temps, entre la grande et la petite industrie, entre les grands et les petits centres de production et de consommation. Le tarif allemand, en introduisant les classes générales de marchandises en charge de wagon, sans distinction de produits, a accentué cette inégalité et en a exagéré les effets.

Les agences de transports ou les groupeurs, sont de-

venus les intermédiaires entre le producteur et le négociant, d'une part, et l'administration du chemin de fer, d'autre part. Le groupeur fait un triage soigneux des marchandises que la petite industrie lui remet; il réunit les colis qui sont de nature à être chargés en poids de 10 tonnes dans un même wagon; il utilise entièrement la puissance de chargement du wagon, et obtient ainsi l'application du tarif le plus bas.

Mais l'administration du chemin de fer refuse toute garantie en ce qui concerne les avaries, l'une par l'autre, des marchandises groupées. Il en résulte que la charge d'un wagon pourra se composer d'articles différents classés dans un même tarif spécial, ou dans divers tarifs spéciaux, soit encore d'articles des tarifs spéciaux et d'autres marchandises non comprises dans les tarifs spéciaux. On applique toujours la taxe correspondant à la marchandise rangée dans la classe la plus élevée du tarif.

En autorisant le groupage, le tarif allemand accorde aux groupeurs de marchandises une prime qui est, en moyenne, assez élevée. Ainsi, dans les tarifs des chemins de fer de l'État de Prusse, la taxe par tonne et par kilomètre de petite vitesse, en expéditions partielles,

	centimes.
est de.	13,75
Classe A.	8,375
Différence.	5,375

Soit un bénéfice de 5,375 centimes par tonne et par kilomètre, au profit de l'expéditeur et du groupeur qui réunira la marchandise pour l'expédier en poids d'au moins 5 tonnes.

Dans le cas où le groupeur peut réunir, en destination d'une même gare, des marchandises par wagon complet de 10 tonnes, le minimum de la prime du groupeur correspondra au cas où cette expédition sera tarifée à la classe B.

La taxe, par tonne et par kilomètre, s'élève :

	centimes.
Pour les expéditions partielles, à....	13,75
Pour la classe B, à............	7,50
Différence......	6,25

Soit un bénéfice de 6,35 centimes par tonne et par kilomètre, que le groupeur pourra partager avec les expéditeurs.

La prime des groupeurs est assez belle pour que l'institution de ces intermédiaires que le tarif allemand place entre le producteur et le chemin de fer, soit très prospère, et qu'une grande partie des marchandises à expédier par chemins de fer passe entre les mains de ces groupeurs.

Nous allons montrer par quelques chiffres à quel rapide développement des expéditions par wagon complet a donné lieu l'application du tarif allemand actuel.

L'intensité du trafic des marchandises par kilomètre du réseau allemand a atteint, en 1884, pour une longueur moyenne exploitée de 36.285 kilomètres, le chiffre de 426,684 tonnes. Ce chiffre se décompose comme il suit :

Messageries.................	2.495	tonnes
Expéditions partielles..........	24.053	—
— par wagon complet.....	401.409	—
Transports en régie taxés........	11.296	—
Équipages...............	481	—
Bestiaux.................	6.950	—
Total..........	446.684	tonnes

Ce tonnage moyen par kilomètre des marchandises sur le réseau allemand donne, si on le rapporte à 100, les chiffres proportionnels suivants pour les années 1879, 1881 et 1884.

NATURE DU TONNAGE	1879	1881	1884
Messageries	0,7	0,6	0,6
Expéditions partielles	7,9	6,6	5,4
— par wagon complet	88,7	89,5	89,8
Transports en régie taxés	0,5	1,6	2,5
Équipages	0,1	0,2	0,1
Bestiaux	1,9	1,4	1,5
Bagages	0,2	0,1	0,2
Totaux	1,000	100,0	100,0

Les expéditions par wagon complet représentent donc en chiffre rond, en 1884, 90 p. 100 du trafic des marchandises en Allemagne. La valeur proportionnelle du tonnage des expéditions par wagon complet augmente d'année en année, tandis que le tonnage des expéditions partielles diminue.

La recette moyenne par kilomètre du trafic des marchandises s'est élevée, en 1884, à 23.820 francs; elle se répartit comme il suit entre les différentes catégories de marchandises,

NATURE DU TONNAGE (1884)	RECETTE moyenne par kilomètre	PROPORTION p. 100	TAXE moyenne perçue
	francs		centimes
Bagages (excédants)	310	1,3	»
Messageries	672	2,8	26,96
Expéditions partielles	3.622	15,2	15,07
— par wagon complet	17.426	73,1	4,34
Transports en régie taxés	301	1,3	2,66
Équipages	26	3,5	5,45
Bétail	807		11.62
Recettes accessoires	656	2,8	»
Totaux ou moyennes	23.820	100,0	5,12

Le tonnage kilométrique des expéditions par wagon

complet représente 90 p. 100 du tonnage total des marchandises transportées sur le réseau allemand; la recette correspondante atteint en chiffre rond 73 p. 100 de la recette totale des marchandises.

Si l'on étudie la manière dont les recettes kilométriques du trafic des marchandises se répartissent en 1879, 1881 et 1884, on arrive aux résultats du tableau suivant :

NATURE DU TONNAGE	RÉPARTITION des recettes kilométriques moyennes		
	1879	1881	1884
Bagages	2,0	1,7	1,3
Messageries	3,3	3,1	2,8
Expéditions partielles	18,6	17,3	15,2
— par wagon complet	69,5	71,3	73,1
Transports en régie taxés	0,3	0,6	1,3
Équipages et bétail	4,1	3,6	3,5
Recettes accessoires	2,2	2,4	2,8
Totaux	100,0	100,0	100,0

La principale conclusion que l'on peut déduire des chiffres du tableau précédent est que la part de la recette des expéditions partielles diminue constamment, tandis que celle des expéditions par wagon complet augmente toujours; la somme des deux parts se maintient, du reste, à une hauteur constante.

Avantages et inconvénients pour les administrations de chemins de fer.

Il reste à examiner les avantages et les inconvénients que le nouveau tarif allemand présente au point de vue des administrations de chemins de fer.

Les éléments qui influent le plus sur les dépenses de l'exploitation proprement dite d'une ligne ferrée sont de nature très diverse; on peut citer parmi eux : le prix des

matières consommées par les services de l'exploitation, les salaires, le prix de la main-d'œuvre, la plus ou moins bonne utilisation du matériel roulant, la rapidité du transport, etc... Le système du nouveau tarif allemand exerce de l'influence sur l'un de ces éléments, la bonne utilisation de la puissance de chargement des wagons. Le tarif étant d'autant plus bas que cette puissance de chargement est mieux utilisée, les grands industriels et les groupeurs font tous leurs efforts pour avoir un chargement complet de wagon; ils s'appliquent à arrimer leurs marchandises de façon à charger dans un seul et même wagon un poids de marchandises de 10 tonnes (ce poids de 10 tonnes est en général celui de la puissance de chargement des wagons). Le tarif allemand donne donc lieu à une meilleure utilisation du matériel roulant : c'est là un avantage réel pour le chemin de fer; car le parc étant mieux utilisé, les frais de traction, d'entretien des véhicules, etc..., diminuent.

Voici un exemple qui permettra de se rendre compte de l'économie générale du tarif allemand de petite vitesse, en même temps qu'il fera ressortir tout l'intérêt qu'ont les groupeurs à utiliser le mieux qu'ils peuvent les wagons mis à leur disposition.

Un groupeur a réuni, un jour déterminé, des marchandises en poids de 5.000 kilogrammes et en destination d'une ville déterminée, située à 100 kilomètres ; le même jour, il a une seconde expédition de 5.000 kilogrammes pour la même destination. Au lieu de les expédier toutes deux isolément dans deux wagons, il n'en fait, lorsque la nature de la marchandise le permet, qu'une seule expédition de 10 tonnes qu'il charge dans un seul wagon.

L'utilisation du matériel roulant, au lieu d'être de 50 p. 100, devient 100 p. 100.

Quelles seront les taxes de transport dans les deux cas ?

Deux expéditions de 5 tonnes auraient coûté (classe A_1) :

$$83{,}75 + 25{,}0 = 108^f{,}75.$$

Une seule expédition des mêmes marchandises, en un seul wagon (classe B), coûtera :

$$75 + 15 = 90 \text{ francs.}$$

Soit une économie de $18^f{,}75$.

Calculons aussi le prix de ces 10 tonnes de marchandises dans l'hypothèse de l'expédition faite d'après le tarif au colis (expéditions partielles).

Le prix de transport eut été dans ce cas :

$$137{,}50 + 25{,}0 = 162^f{,}50.$$

Ainsi, si l'expéditeur n'a pas recours au groupage pour le transport de ses 10 tonnes, il payera au moins $162^f{,}50$ de port ; s'il groupe par 5 tonnes de chargement dans un wagon, les frais de transport seront de $108^f{,}75$; si, au contraire, il charge les 10 tonnes dans un seul wagon couvert, il ne paiera que 90 francs, soit une économie de $53^f{,}75$ ou de 33 p. 100 dans un cas, et de $72^f{,}50$ ou de 44 p. 100 dans l'autre.

Le groupeur a donc des motifs très sérieux d'utiliser entièrement le matériel roulant dont il dispose.

Utilisation du matériel roulant.

L'utilisation du matériel roulant servant au transport des marchandises est, en effet, devenue meilleure, depuis l'application du tarif allemand actuel. Pour le montrer, nous allons comparer les coefficients d'utilisation du parc du matériel roulant en Allemagne relatifs à des années antérieures à 1877 à ceux obtenus postérieurement à 1877 (*) :

(*) L'année 1877 est celle dans le cours de laquelle le tarif allemand actuel a été appliqué. Dans la suite de notre étude, lorsque nous parlerons de

RÉSEAUX	UTILISATION DU MATÉRIEL ROULANT P. V.					
	1873	1874	1875	1879	1881	1884
	p 100	p. 100	p. 100	p 100	p. 100	p. 100
Réseau d'État en Allemagne	37,85	37,10	39,13	39,98	43,14	45,14
Chemins concédés allemands exploités par l'État	49,93	48,15	51,04	46,52	49,00	42,43
Chemins concédés allemands exploités par les compagnies	41,88	39,47	40,58	42,48	43,27	42,82
Réseau allemand	40,93	39.52	41,49	41,99	44,17	44,97

Les chiffres du tableau qui précède s'appliquent à l'ensemble des trois grands groupes de réseaux qui existent en Allemagne, et dont deux, celui des lignes concédées exploitées par l'État et celui des lignes concédées exploitées par des compagnies, tendent peu à peu à disparaître par suite du rachat par l'État de tous les chemins de fer concédés. Les longueurs des trois groupes de lignes étaient, en effet, en 1873 et 1885 :

RÉSEAUX	LONGUEURS EXPLOITÉES	
	1873	1885
	kilomètres	kilomètres
Chemins de fer concédés exploités par l'État.	2.555	385
— — par les compagnies.	10 502	4.284
— de l'État	10.706	32.699
Totaux	23.763	37.368

On voit, en particulier, que le groupe des lignes concédées exploitées par l'État a presque entièrement disparu. C'est, du reste, pour ce groupe seulement que le tableau des coefficients d'utilisation du matériel indique, pour la

l'année 1877, cela voudra dire qu'elle marque la limite entre l'application de l'ancien tarif de classification en Allemagne et la mise en vigueur du tarif allemand actuel.

période antérieure à 1877 des coefficients supérieurs à ceux de la période postérieure à 1877. Cela tient à ce que deux réseaux importants, celui de la Marche de Berg et celui de la Haute-Silésie, tous les deux desservant de puissants bassins houillers, ont été rachetés par l'État.

Si l'on fait abstraction de ce groupe des lignes concédées exploitées par l'État, qui n'a plus qu'un développement de 385 kilomètres, on voit que la loi de l'augmentation du coefficient d'utilisation est générale, que ce coefficient continue à s'améliorer. Cette amélioration a pour cause l'augmentation constante du tonnage des expéditions par wagon complet, que nous avons signalée plus haut.

On peut dire que, pour l'ensemble du réseau allemand, l'amélioration absolue obtenue dans l'utilisation du matériel roulant varie de 2 à 4 p. 100 de la capacité de chargement du matériel, et que l'amélioration relative atteint en moyenne 9 p. 100 de l'ancienne utilisation du parc de petite vitesse.

L'influence de cette meilleure utilisation sur le prix de revient des transports en petite vitesse est très sensible. Le prix de revient du transport d'une tonne de marchandises à un kilomètre s'est élevé, en 1884, sur l'ensemble du réseau allemand, à 2,79 centimes. Le coefficient d'utilisation du matériel de petite vitesse a été de 44,97 p. 100, et, comme les wagons ont, en général, 10 tonnes de capacité de chargement, la charge nette moyenne d'un wagon s'est élevée, en chiffres ronds, à 4.500 kilogrammes. Cela revient à dire qu'un poids de marchandises de 1 tonne a donné lieu à un transport de poids mort de 1,1 tonnes (le poids moyen d'un wagon vide de petite vitesse étant supposé de 5 tonnes), et que le poids moyen d'un véhicule (tare et chargement) s'est élevé à 9,500 tonnes. Admettons que sous l'influence de l'extension donnée aux expéditions par wagon complet, le coefficient

d'utilisation s'élève à 50 p. 100, le poids moyen d'un véhicule (tare et chargement) sera de 10 tonnes, la diminution de poids mort à transporter par tonne nette sera de $1{,}1 - 1{,}0 = 0{,}1$ tonne. Il y aurait donc, par tonne kilométrique de poids net, une économie de transport de 0,1 tonne de poids mort, ce qui, sur base des données statistiques de 1884, donnerait une économie totale de transport de 1 milliard et demi de tonnes kilométriques de poids mort sur tout le réseau allemand. En admettant que le prix de revient par tonne nette kilométrique reste à peu près le même et égal à 2,79 centimes, celui de la tonne brute kilométrique serait de $\frac{2{,}79 \times 5}{5+5} = 1{,}39$ centimes, et l'économie de dépenses pour l'ensemble du réseau allemand s'élèverait à environ 22 millions de francs. La dépense d'exploitation sur tout le réseau allemand s'est élevée, en 1884, en chiffres ronds, à 662 millions de francs; l'économie réalisée représenterait donc 3,5 p. 100 de la dépense totale d'exploitation.

Prix des transports.

L'absence de toute classification des marchandises, sauf celle des trois tarifs spéciaux, et l'existence d'une seule classe d'expéditions partielles pour les marchandises en petite vitesse, ont eu une influence capitale sur la fixation de la hauteur des taxes à percevoir, par tonne et par kilomètre, pour le transport des marchandises.

Les taxes unitaires, en effet, sont moins élevées que celles de l'ancien système des tarifs de la classification. Et il doit en être ainsi dans tout système de tarifs où le poids seul de l'expédition (sauf pour les trois tarifs spéciaux) sert à déterminer la taxe à appliquer. Les taxes des expéditions partielles, ainsi que celles des expéditions

en charge de wagon, classes A_1 et B, sont des taxes moyennes que l'administration supérieure allemande a dû fixer en partant du principe qu'elles devaient s'appliquer à toute espèce de marchandises, qu'elle ait du prix ou qu'elle n'en ait pas. Par suite, cette taxe moyenne à percevoir pour chaque article ne pouvait pas être très élevée ; car une taxe élevée, frappant indistinctement tous les articles à transporter, eût exclus du transport par chemin de fer tous les produits de faible valeur, pour lesquels le prix de transport atteint et dépasse parfois le prix de production, et qui, pour les besoins du commerce ou de l'industrie, ne se présentent et ne sont nécessaires que rarement en expéditions d'un poids d'au moins 5 tonnes. Il fallait donc, puisqu'on ne voulait qu'une seule taxe, ou la prendre élevée et nuire au trafic des marchandises de moindre valeur, ou la prendre peu élevée, et se résigner à transporter les marchandises de prix à une taxe trop faible.

Le fait de l'adoption d'une taxe générale moyenne peu élevée s'appliquant indistinctement à toute marchandise, cause, comme il est facile de le voir, un grand préjudice à certains produits qui ne peuvent être transportés à de grandes distances que s'ils sont soumis à une taxe très faible. Dans le système de tarifs de la classification, les taxes élevées perçues pour les articles ayant une certaine valeur, permettaient de transporter à bas prix tous les produits pour lesquels le bon marché de transport était une condition *sine qua non* de la circulation ou de l'expédition ; il y avait là une sorte de compensation. Dans le système du tarif allemand actuel, la taxe n'est réellement très réduite que lorsque les expéditions sont livrées par wagon complet ; mais il faut au moins 5 tonnes de chargement pour avoir droit à une taxe réduite. On n'a pas toujours 5.000 kilogrammes à expédier, même lorsqu'il s'agit d'objets de peu de valeur ; quelquefois aussi le vo-

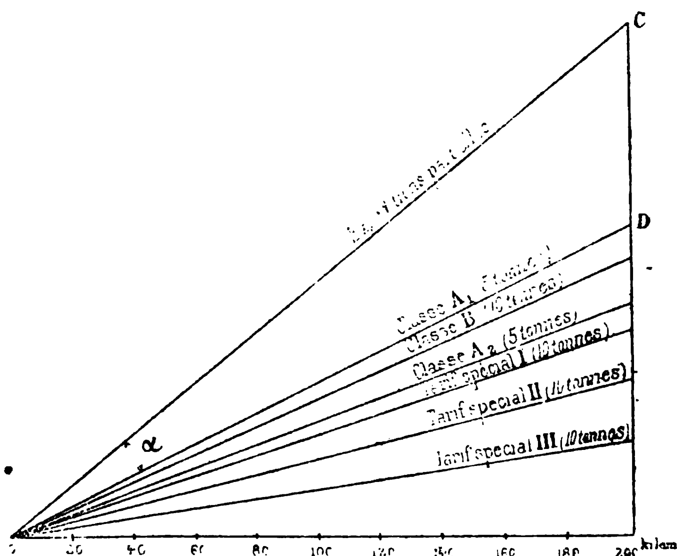
lume ou le cautionnement d'une marchandise s'oppose à son chargement dans un seul wagon, en poids de 5 ou de 10 tonnes, et, dans ce cas, le tarif allemand donne un prix de transport plus fort, très souvent, que celui qui résulterait de l'application des taxes de l'un des systèmes de tarifs de la classification en vigueur dans d'autres pays. Il est, par suite, très facile à ceux qui veulent à tout prix démontrer que les tarifs allemands sont plus élevés que les tarifs français, ou à ceux qui, réciproquement, veulent prouver l'inverse, et qui ignorent l'économie du système actuel des tarifs allemands, d'obtenir les uns et les autres chiffres à l'appui de leur thèse. Il suffit de se borner à considérer les expéditions partielles, et pour les premiers, de comparer la classe des expéditions partielles du tarif allemand avec diverses marchandises de l'une des dernières séries du tarif général français; pour les seconds, de faire la comparaison de cette classe d'expéditions partielles avec des articles de l'une des premières séries du tarif général français. Cela revient à dire que dans le graphique que nous donnons plus loin, les lignes représentatives des premières séries du tarif général français seraient au-dessus de la ligne des expéditions partielles, tandis que les lignes représentant les dernières séries seraient au-dessous de la ligne des expéditions partielles.

Les inconvénients du système allemand n'ont pas tardé à se faire sentir, surtout en ce qui concerne les articles n'ayant pas une très grande valeur, dont les expéditions n'atteignaient pas le poids de 5 ou de 10 tonnes, et qui étaient tarifés à la taxe des expéditions partielles, c'est-à-dire à 13,75 centimes par tonne et par kilomètre, plus une taxe d'expédition de 2f,50 par tonne.

Aussi, l'un des desiderata formulés dès les premiers temps de la mise en vigueur, a été la création d'une

deuxième classe d'expéditions partielles à base kilométrique inférieure à celle de la classe actuelle des expéditions partielles.

Si l'on représente, en effet, graphiquement, les lignes droites figuratives des taxes à percevoir pour chacune des classes du tarif général allemand, on obtient les droites indiquées dans le croquis ci-après :



On voit clairement avec ce graphique l'importance de l'angle α qui sépare la ligne des expéditions partielles de celle de la classe A_1. On se rend compte de la disproportion qui existe entre les taxes des expéditions partielles et celles des autres classes, et on comprend que dans l'intérieur de cet angle α, une partie du commerce allemand demande instamment l'établissement d'une deuxième classe d'expéditions partielles.

Il est vrai que la création d'une seconde classe d'expéditions partielles serait un pas en arrière fait vers l'an-

cien système de la sérification, et que le système de tarif allemand actuel ne conserverait plus la formule simple qui constitue aujourd'hui un de ses avantages.

Taxes proportionnelles à la distance.

Les taxes fixées par le tarif général allemand pour le transport des marchandises sont toutes proportionnelles à la distance que les marchandises doivent parcourir. Le tarif général ne contient pas de taxes dont la base kilométrique aille en décroissant à mesure que la distance augmente. Quelques tarifs d'exception, en très petit nombre, renferment des taxes différentielles. On peut dire que le principe de la proportionnalité de la taxe aux parcours constitue la règle à peu près générale de la tarification allemande de la petite vitesse.

Ce système, que la chancellerie impériale a imposé aux chemins de fer de l'État et aux compagnies de chemins de fer allemandes, fait partie intégrante de la politique économique appliquée en Allemagne depuis 1870. Le tarif allemand est, en effet, un tarif essentiellement protectionniste, qui empêche la marchandise d'être transportée à de très grandes distances malgré les faibles bases kilométriques perçues pour les expéditions par wagons complets. Aussi, si l'on compare, par exemple, la tarification allemande à la tarification des chemins de fer de l'État belge, qui, elle, ne contient que des taxes à base rapidement décroissante avec le parcours, on se rend aisément compte de l'influence que l'application de l'un ou de l'autre de ces systèmes peut exercer sur la politique douanière des deux pays où ces systèmes sont en vigueur. Nous renvoyons à ce que nous avons dit à ce sujet dans notre mémoire sur les tarifs de chemins de fer de l'État belge (*Annales* de 1882, 1er semestre, p. 306 et suivantes).

Résultats financiers.

Lorsqu'en 1877, le système actuel de tarifs a été inauguré sur tout le réseau allemand, il a été substitué au tarif de classification des marchandises en vigueur jusqu'alors; on était dans une incertitude complète sur la question de savoir quels seront les résultats financiers de l'application du nouveau système de tarifs, et quels seront en particulier les nouveaux tarifs moyens perçus, et le nouveau taux de l'intérêt du capital de construction.

Aujourd'hui que l'essai fait avec le nouveau tarif a duré neuf années, et que la statistique a fourni des chiffres permettant d'analyser les résultats de l'expérience tentée par l'administration allemande, nous allons examiner quelles conséquences financières a amené la mise en vigueur du nouveau tarif allemand.

Tarif moyen par tonne et par kilomètre.

Lorsque la nature du trafic reste sensiblement la même, ce que l'on peut admettre comme étant vrai sur chacun des réseaux d'État en Allemagne, le tarif moyen perçu est un des résultats de l'exploitation qui est en connexion intime avec la tarification en vigueur. Si l'on considère les principaux réseaux d'État en Allemagne, on obtient les tarifs moyens consignés dans le tableau suivant. Les chiffres de ce tableau, ainsi que ceux des tableaux suivants sont puisés dans la statistique de l'Union des chemins de fer allemands.

RÉSEAUX	TARIF MOYEN PAR TONNE ET PAR KILOMÈTRE					
	1873	1874	1875	1879	1881	1884
	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
Etat de Bavière	6,65	7.15	7.34	6,33	6 27	6,03
Etat de Saxe	6.42	6.62	7,09	6,47	6.49	6,21
Etat de Wurtemberg	7,10	7,10	7,67	7,96	7.73	7,49
Etat d'Alsace-Lorraine	5,05	5,36	5.74	5,09	5,01	4,77
Etat de Prusse	5,27	5,26	5,92	5,35	5,05	4,98
Réseau d'Etat allemand	5,82	6,00	6,45	5,89	5,56	5,06
Chemins de fer concédés exploités par l'Etat	5,40	5,07	5,24	4,98	4,74	5,59
Chemins de fer concédés exploités par des Compagnies	6,02	6,30	6,47	5,66	5,99	5,59
Réseau allemand	5,80	5,97	6,22	5,63	5,47	5,12

Les chiffres du tableau précédent indiquent avec la plus grande évidence que le tarif moyen perçu sur les réseaux allemands (sauf le réseau d'État de Wurtemberg sur lequel la proportion des expéditions partielles est supérieure au double de la proportion qui s'applique à l'ensemble des réseaux d'État en Allemagne, 11 p. 100 au lieu de 5,3 p. 100 en 1884), a baissé, quand on passe de la période antérieure à 1877 à celle postérieure à 1877. En outre, ce tarif moyen continue à baisser encore. C'est là une conséquence de l'application des taxes peu élevées des classes par wagon complet A_1, B, A_2 et des trois tarifs spéciaux.

Par suite, la rémunération moyenne des administrations de chemins de fer pour le transport d'une tonne à 1 kilomètre, est inférieure sous l'empire du nouveau tarif à la rémunération donnée antérieurement par l'application des tarifs de classification. Mais avant de pouvoir affirmer si, au point de vue financier, les résultats obtenus par les nouveaux tarifs sont inférieurs à ceux donnés par les anciens, il convient de rechercher si le système actuel de tarification n'a pas amené dans les dépenses d'exploitation une diminution telle que la perte de recette par tonne kilométrique, due à l'application du nouveau tarif,

soit compensée par l'économie dans le prix de revient du transport. Il faut donc calculer d'abord les prix de revient, et chercher ensuite le rapport qui existe entre le prix de revient et le tarif moyen perçu, ou encore entre la dépense et la recette de l'exploitation.

Le calcul des tarifs moyens perçus indiqués ci-dessus, est fait dans la statistique du *Verein* allemand, en tenant compte de la recette et du tonnage de la messagerie. Afin de montrer l'influence que ce mode de calcul exerce sur le tarif moyen perçu pour les marchandises, nous donnons ci-après, pour l'ensemble des réseaux d'État en Allemagne, le tarif moyen de la petite vitesse :

ANNÉES	TARIF MOYEN PERÇU P. V.	TARIF MOYEN PERÇU P. V. et G. V.
	centimes	centimes
1879	5,74	5,89
1881	5,33	5,56
1884	4,94	5,06

Le tarif moyen perçu, par tonne et par kilomètre, pour les marchandises à petite vitesse, a diminué de 5,74 centimes, en 1879, à 4,94 centimes, en 1884.

Prix de revient des transports.

Le tarif moyen perçu représente la rémunération moyenne, par tonne et par kilomètre, des transports effectués sur les chemins de fer allemands. A côté de cette rémunération moyenne du transport, perçue par l'administration du chemin de fer, nous allons placer ce que le transport en question lui a coûté, en moyenne, par tonne et par kilomètre.

Nous ferons le calcul du prix de revient du transport d'une tonne à un kilomètre à l'aide de la méthode que

nous avons développée dans les *Annales des ponts et chaussées*, en 1875 et en 1885.

Les données de la statistique de l'Union des chemins de fer allemands permet de déterminer les chiffres du tableau suivant :

RÉSEAUX	PRIX DE REVIENT PAR TONNE ET PAR KILOMÈTRE					
	1873	1874	1875	1879	1881	1884
	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
Etat de Bavière	4,01	4,20	4,52	3,30	3,31	3,04
Etat de Saxe	3,65	3,10	3,71	3,42	3,24	3,25
Etat de Wurtemberg	3,45	3,51	3,49	3,49	3,37	3,20
Etat d'Alsace-Lorraine	4,68	4,76	4,43	2,91	2,88	2,73
Réseau d'Etat allemand	3,96	4,05	3,97	3,17	2,85	2,78
Chemins de fer concédés exploités par l'Etat	3,15	2,96	2,68	2,19	2,50	2,45
Chemins de fer concédés exploités par des Compagnies	3,38	3,53	4,05	2,81	3,10	3,04
Réseau allemand	3,56	3,67	3,53	2,93	2,83	2,79

Il résulte des chiffres du tableau qui précède que le prix de revient, par tonne et par kilomètre, sur le réseau allemand, est très notablement inférieur, en 1879, 1881 et 1884, au prix de revient afférent aux années 1873, 1874 et 1875. Si l'on considère, par exemple, les chiffres qui s'appliquent à l'ensemble du réseau allemand, on voit que, en 1873, le prix de revient atteignait 3,56 centimes, et qu'il ne s'élevait qu'à 2,83 centimes en 1881, c'est-à-dire qu'en 1881, il était de 26 p. 10 inférieur à celui de 1873. Les prix de revient sur l'ancien réseau français se sont élevés respectivement, en 1873 et en 1881, à 2,67 centimes et 2,40 centimes, soit une diminution de 11 p. 100. La diminution correspondante du nouveau réseau est de 10 p. 100. Le prix de revient en Allemagne a donc diminué dans une proportion plus forte qu'en France.

L'intensité du trafic par kilomètre, en Allemagne, a diminué pour les voyageurs à mesure que le réseau a

pris un développement plus considérable ; le nombre des voyageurs par kilomètre est inférieur, en 1884, au chiffre correspondant de 1877. Le tonnage des marchandises par kilomètre est, au contraire, supérieur, en 1884, au tonnage correspondant de 1873. Le nombre des voyageurs et celui des tonnes de marchandises, par kilomètre, ont atteint les chiffres suivants sur l'ensemble du réseau allemand :

ANNÉES	LONGUEUR exploitée	VOYAGEURS Par kilomètre	MARCHANDISES Tonnes par kilomètre
	kilomètres	voyageurs	tonnes
1873	23.215	247.082	426.624
1874	24.270	243.369	401 301
1875	26.506	229.347	392.581
1879	31.994	161.941	375.091
1881	33.406	170.790	403.616
1884	36.285	212.211	447 184

Si, d'après les indications du tableau qui précède, l'augmentation de l'intensité du trafic des marchandises a dû influer dans une certaine mesure sur la valeur du prix de revient, il convient de rechercher la principale cause de la forte diminution du prix de revient en Allemagne ailleurs que dans cette augmentation de l'intensité du trafic. Le principal motif de cette diminution réside, d'une part, dans l'amélioration de l'utilisation du matériel roulant; cette amélioration, dont nous avons indiqué l'importance plus haut, est due à l'application du système actuel des tarifs allemands. D'autre part, l'économie des frais de manutention que l'application du *tarif au wagon* a entraînée avec elle, a donné lieu également à une diminution de dépenses d'exploitation et, par suite, du prix de revient des transports.

Coefficient d'exploitation.

Notre étude serait incomplète si l'on n'examinait pas dans quelle mesure le tarif du transport des marchandises appliqué en Allemagne depuis 1877 a pu amener des modifications du coefficient d'exploitation. Cela revient à chercher si, pour obtenir une recette de 100 francs avec les nouveaux tarifs, il a fallu faire une dépense supérieure ou inférieure à celle qui était nécessaire pour obtenir la même recette de 100 francs avec les anciens tarifs de la classification des marchandises. Le tableau suivant donne le coefficient d'exploitation obtenu sur les réseaux étudiés jusqu'à présent.

RÉSEAUX	COEFFICIENT D'EXPLOITATION					
	1873	1874	1875	1879	1881	1884
Etat de Bavière	61,09	60,25	59,25	57,0	51,6	52,8
Etat de Saxe	63,41	62,26	60,73	58.0	54,3	56,0
Etat de Wurtemberg	51,96	57,68	54,28	52,0	52,0	51,3
Etat d'Alsace-Lorraine	93,35	78,85	68,93	58,0	56,4	55,3
Etat de Prusse	66,80	75 40	65,40	59,2	51,8	54,7
Réseau de l'Etat allemand	66,30	70,17	64,68	57,7	52,8	54,4
Chemins de fer concédés allemands exploités par l'Etat	58,21	57,60	51,29	49,8	51,6	57,6
Chemins de fer concédés exploités par des compagnies allemandes	58,18	59,15	54,90	50,1	54,7	53,8
Réseau allemand	61,81	63,84	58,83	53,6	52,9	54,3

L'examen des chiffres du tableau qui précède montre que dans la période des années 1873, 1874, 1875, antérieures à 1877, la dépense moyenne d'exploitation nécessitée sur les divers réseaux allemands pour obtenir une recette de 100 francs (64,81, — 63,84, — 58,83) est supérieure à la dépense moyenne faite, sur les mêmes réseaux, pour obtenir cette recette de 100 francs, pendant la pé-

riode postérieure à 1877 (53,6, — 52,9, — 54,3). Les coefficients d'exploitation afférents aux années pendant lesquelles le nouveau système de tarifs allemands a été en vigueur sont donc plus favorables que le coefficient d'exploitation des années dans le courant desquelles les tarifs de classification ont été appliqués. On peut déduire de là que l'influence exercée sur le coefficient d'exploitation par la diminution du tarif moyen perçu que nous avons signalée plus haut, diminution qui est due à l'importance de la proportion du trafic des classes par wagons complets du tarif actuel, est inférieure à celle qui résulte de l'économie réalisée sur le prix de revient des transports (*). Cette économie est surtout la conséquence de l'application du tarif allemand actuel, et est due, en majeure partie, à la meilleure utilisation du matériel roulant, et à la diminution des frais de manutention.

Intérêt du capital de construction.

Pour terminer cette étude des résultats financiers obtenus par la mise en vigueur du nouveau système de tarifs allemands, il reste à rechercher quel a été, avec ce système, le taux de l'intérêt que le produit net a permis de servir au capital de premier établissement des divers réseaux d'État en Allemagne.

Nous donnons dans le tableau suivant le taux de l'intérêt du capital de construction des principaux réseaux d'État en Allemagne.

(*) Sur l'ensemble des réseaux d'intérêt général français, le coefficient d'exploitation s'est élevé, d'après la statistique publiée par le Ministère des Travaux publics, en 1879, à 51,6, et en 1881, à 49,0. Ce coefficient avait atteint, en 1873 et en 1874, les valeurs respectives de 51,7 et 51,9.

RÉSEAUX	TAUX DE L'INTÉRÊT du capital de construction					
	1873	1874	1875	1879	1881	1884
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
Etat de Bavière	5,05	4,240	4,21	3,67	3,46	3,77
Etat de Saxe	5,54	5,875	6,02	4,26	4,84	4,76
Etat de Wurtemberg	3,90	3,300	3,51	3,15	2,88	2,99
Etat d'Alsace-Lorraine	0,68	1,910	2,80	2,99	3,57	3,63
Etat de Prusse	5,35	3,860	4,98	4,06	4,88	5,09
Réseau d'Etat allemand	4,38	3,850	4,25	3,73	4,29	4,67
Chemins de fer concédés exploités par l'Etat	6,18	6,010	6,57	5,44	5,63	3,24
Chemins de fer concédés exploités par les compagnies	5,98	5,330	5,61	5,00	4,47	4,16
Réseau allemand	5,26	4,820	5,10	4,41	4,19	4,60

En 1882, le taux de l'intérêt du capital s'est élevé à 4,72 sur tout le réseau allemand; ce taux a été de 4,63, en 1883.

Il semble, si l'on ne considère que les chiffres du tableau qui précède, que le taux de l'intérêt du capital de premier établissement est moindre depuis que les nouveaux tarifs allemands ont été mis en vigueur. Les taux d'intérêt relatifs aux années 1879, 1881, 1884, sont inférieurs (sauf pour le réseau d'Alsace-Lorraine) aux taux des années 1873, 1874 et 1875.

Mais si l'on examine quelles ont été les variations subies par le capital moyen de construction d'un kilomètre du réseau allemand, on arrive aux résultats du tableau suivant :

ANNÉES	CAPITAL MOYEN de construction par kilomètre	TAUX de l'intérêt.	PRODUIT NET par kilomètre (chiffres proportionnels)
	francs	p. 100	(milliers de francs)
1873	296.854	5,26	15,6
1874	311.332	4,82	15.0
1875	322.095	5,10	16,4
1879	325 920	4,41	14,4
1881	340,385	4,49	15,2
1884	333.069	4,60	15,4

La diminution du taux de l'intérêt du capital de premier établissement à partir de 1879 est due, d'après les chiffres du tableau qui précède, en partie à l'augmentation du capital de construction par kilomètre de réseau. On peut donc affirmer, que d'un côté, dans les premières années de l'application du nouveau tarif allemand, le produit net par kilomètre (voir les chiffres proportionnels de la dernière colonne du tableau ci-dessus) est inférieur au produit correspondant des années antérieures à 1877, et que, d'un autre côté, ce produit a augmenté constamment après la mise en vigueur du tarif actuel, et qu'en 1881 et en 1884, il a atteint le chiffre moyen afférent aux années 1873 et 1874. L'année 1875 donne un produit proportionnel égal à 16,4, qui est supérieur à tous les produits indiqués. L'importance de ce produit proportionnel est due au relèvement de 20 p. 100 des tarifs de marchandises que les administrations allemandes de chemins de fer ont été autorisées, après une enquête administrative, à appliquer dans le cours de l'année 1874. Le conseil fédéral n'avait, du reste, autorisé ce relèvement de 20 p. 100 que sous la réserve de l'application par toutes les administrations allemandes de chemins de fer d'un système uniforme de tarifs. Les études et enquêtes qui ont été faites postérieurement à cette décision du conseil fédéral ont amené finalement l'adoption, en 1877, du système actuel de tarifs.

CHAPITRE V.

RÉSÜMÉ ET CONCLUSIONS.

Le tarif allemand actuel, pour le transport des marchandises, est issu, dans les plus importantes de ses

dispositions, de l'ancien *tarif au wagon* d'Alsace-Lorraine. Il ne contient qu'une seule classe d'expéditions partielles, et deux classes A_1 et B de marchandises par wagon complet dont le chargement peut être composé d'articles les plus divers. Enfin, il renferme trois tarifs spéciaux dont les taxes ne s'appliquent qu'à des produits dénommés dans l'annexe, et expédiés par wagons complets de 10 tonnes.

La mise en vigueur de ce tarif offrait, en 1877, tout l'aléa que pouvait présenter l'essai d'une tarification essentiellement différente de celle adoptée en Allemagne depuis l'origine des chemins de fer. L'application du système d'Alsace-Lorraine avait été aussi un essai, et les résultats financiers qu'il a amenés ont été mauvais; il suffit de se reporter aux chiffres indiqués dans le chapitre précédent, en 1873 et 1874, pour le réseau d'Alsace-Lorraine.

Il est vrai que le tarif allemand actuel a corrigé le système de tarifs d'Alsace-Lorraine en ce qu'il avait de trop absolu, et a admis une sérification des marchandises, mais seulement pour les trois tarifs spéciaux.

Si le tarif allemand présente pour le public des avantages très réels de simplicité et de modicité des taxes de transport lorsqu'il s'agit d'expéditions par wagon complet, il offre aussi des inconvénients; il ne serait pas exact de le considérer au point de vue exclusif du public comme un système parfait. Il ne tient pas compte de la valeur de la marchandise, sauf dans ses trois tarifs spéciaux. Dans un tarif de marchandises, appliquer la même taxe, quelle que soit la valeur des articles transportés, revient à favoriser les objets de prix au détriment des produits de moindre valeur dont l'expédition et même la production dépendent souvent du prix de transport, et pour lesquels les frais de transport constituent la partie principale du prix d'achat au lieu d'emploi. Aussi, l'u-

nique classe des expéditions partielles a-t-elle déjà soulevé de nombreuses réclamations de la part de l'industrie et du commerce qui demandent la création d'une deuxième classe d'expéditions partielles.

Les classes générales A_1 et B de marchandises par wagon complet du tarif allemand actuel dont les taxes s'appliquent quels que soient les articles constituant le chargement par wagon complet ; elles favorisent les expéditions en charge de wagon bien plus que ne l'ont fait et ne le font les tarifs de classification des marchandises. Plus le poids d'une expédition est grand, plus le tarif à percevoir est faible. Ce principe de la diminution de la taxe quand le poids de l'expédition augmente a été de tout temps appliqué par les administrations de chemins de fer. Ce qui distingue à cet égard le nouveau tarif allemand, c'est qu'en supprimant toute classification pour les expéditions partielles et les classes A_1 et B, il a favorisé et facilité dans une bien plus large mesure que les tarifs de classification, les expéditions en poids de 5 tonnes ou de 10 tonnes. Il suffit de se reporter au chiffre qui représente, en Allemagne, le tonnage des expéditions par wagons complets. Ce tonnage représente aujourd'hui 90 p. 100 du tonnage total des marchandises.

Il se peut que le nouveau système allemand réalise, dans l'avenir, l'idéal en matière de tarif. Une contrée dont le trafic consisterait presque exclusivement en matières premières, en produits encombrants, transportés en très grandes quantités, aurait avantage, croyons-nous, à adopter un système se rapprochant du tarif allemand. L'administration du chemin de fer ne saurait plus, en effet, dans ces conditions, s'occuper aussi utilement et aussi économiquement que l'industrie privée, de la manutention, du chargement et du déchargement de gros transports et de grandes masses. Dans tous les cas, l'in-

tensité et la nature du trafic actuel, dans la majeure partie des pays de l'Europe, ne nécessite pas encore un pareil idéal théorique.

Quelques grandes administrations de chemins de fer, en Allemagne, s'étaient montrées, dès l'abord, assez favorables au principe du nouveau système de tarifs; elles estimaient que le chargement et le déchargement des marchandises des classes A_1, B, et des tarifs spéciaux, effectués par les groupeurs ou les expéditeurs et les destinataires, amèneraient pour elles un véritable soulagement au milieu du travail dont elles étaient surchargées.

En raison de l'enchevêtrement qui existait alors dans les réseaux des chemins de fer allemands, les diverses administrations avaient un si grand nombre de tarifs directs communs, de tarifs directs internationaux, tarifs d'Unions, etc., qu'elles étaient surtout absorbées par le travail long et pénible de l'établissement de tous ces tarifs, et par le règlement des décomptes des trafics correspondants. Le service central n'avait que peu de temps à consacrer à la surveillance du service actif des gares. La manutention des marchandises dans les magasins des gares, le chargement de ces marchandises dans les wagons, et le déchargement des wagons dans la gare de destination étaient ou devaient être surveillés par le chef de gare. Cet agent devait aussi veiller à la bonne utilisation du matériel roulant. Il était arrivé là ce qui advient presque toujours en pareil cas; les agents de service actif des lignes n'étant que peu ou pas contrôlés, sur lieu et place, par le service central, et n'étant pas, en général, stimulés par une prime pour la bonne exécution des travaux en question, se voyaient abandonnés à leur propre initiative; il devait en résulter une surveillance moins active de la manutention et de l'utilisation des wagons. Il y eut beaucoup de fautes de chargement, beaucoup de fausses directions données aux marchandi-

ses, beaucoup d'indemnités à payer, et le matériel n'était pas utilisé aussi bien que l'administration centrale le demandait.

Or, le nouveau système de tarifs, à l'aide des groupeurs, a débarrassé les administrations de la majeure partie de la manutention des marchandises et du chargement de ces marchandises dans les wagons, ainsi que du déchargement. Elles n'ont plus à s'occuper que de la manutention des expéditions partielles de messagerie et de petite vitesse. Toutes les autres manutentions de la marchandise dans les gares sont faites par les groupeurs ou par les expéditeurs et les destinataires.

En même temps, les administrations de chemins de fer ont obtenu une bien meilleure utilisation de leur matériel roulant; car le groupeur, s'il a intérêt à charger 5 tonnes de marchandises dans un wagon, a encore un bien plus grand intérêt à charger 10 tonnes dans un seul wagon ; sa tendance est d'utiliser le plus qu'il peut la puissance de chargement du wagon.

La prime accordée au groupeur est très élevée, elle atteint, sur les chemins de fer de l'État de Prusse, 5,375 centimes par tonne et par kilomètre, lorsque les marchandises, au lieu d'être transportées en expéditions partielles, sont expédiées en charge de wagon de 5 tonnes; cette prime s'élève à 6,25 centimes par tonne et par kilomètre, lorsque le transport de ces marchandises est effectué au poids de 10 tonnes dans un seul wagon. Ces primes de 5,375 centimes et de 6,25 centimes par tonne et par kilomètre, sont certainement exagérées; elles rémunèrent beaucoup trop le service rendu par le groupeur. Il n'est pas douteux que la partie de cette prime, qui est supérieure à ce que devrait être une rémunération convenable et équitable du travail du groupeur, est de fait enlevée à l'administration du chemin de fer dont la taxe de transport est diminuée d'autant. Cette prime eût pu

être diminuée de près de moitié, et le métier de groupeur aurait encore été très lucratif.

L'influence du travail des groupeurs s'est fait sentir rapidement sur l'utilisation du parc de matériel à marchandises. Le coefficient d'utilisation de ce matériel qui, antérieurement à 1877, s'était élevé en 1873, 1874 et 1875, respectivement à 40,93, 39,52 et 41,49, soit en moyenne 40,64 p. 100, a atteint, en 1879, 1881 et 1884, les chiffres respectifs de 41,99, 44,17 et de 44,97 p. 100, soit en moyenne 43,71.

La chancellerie impériale a imposé le système du tarif actuel à toutes les administrations de chemins de fer, en Allemagne; mais elle a laissé à chaque État fédéral le droit de fixer la hauteur de la taxe kilométrique à percevoir, par tonne, pour chacune des classes de marchandises et des trois tarifs spéciaux. Ces taxes kilométriques varient peu d'un réseau d'État à l'autre, et tendent à devenir uniformes.

Les taxes perçues pour le transport des expéditions des diverses classes et des trois tarifs spéciaux, sont toutes proportionnelles à la distance; il n'y a aucun tarif différentiel, aucune classe dont la taxe unitaire diminue lorsque le parcours augmente. Ce système correspond à la politique économique suivie par le chancelier de l'empire. On ne trouve quelques rares taxes différentielles que dans un certain nombre de tarifs d'exception.

Mais la question la plus importante qu'il convenait d'examiner, celle qui permettait de se rendre compte de la portée économique et financière du système de tarifs adopté en 1877, était la question du rendement financier obtenu sous l'empire de l'application de ce système de tarifs. On pouvait avoir et on avait, en 1877, des inquiétudes sérieuses sur les résultats financiers que donneraient les nouveaux tarifs; on ignorait alors si le tarif moyen perçu serait rémunérateur, si le produit net et le

taux de l'intérêt du capital de construction ne subiraient pas une diminution sensible.

Aujourd'hui qu'on possède la statistique des résultats de l'exploitation obtenus pendant les sept premières années de l'application du système actuel de tarifs (1878-1884), on peut répondre que l'expérience tentée a donné, en somme, des résultats qui ne sont pas très brillants, mais qui peuvent être considérés comme assez satisfaisants, grâce surtout à l'augmentation du trafic des marchandises de 1880 à 1884. Le tarif moyen perçu, par tonne et par kilomètre, de transport des marchandises a, il est vrai, subi une diminution. Il s'élevait, sur l'ensemble du réseau allemand, en 1873, 1874 et 1875, aux chiffres respectifs de 5,80, 5,97 et 6,22 centimes, tandis que, en 1879, 1881 et 1884, il n'a atteint respectivement que les valeurs de 5,63, 5,47 et 5,12 centimes. Mais si l'importance du tonnage des marchandises par wagon complet a amené cette diminution du tarif moyen perçu, par tonne kilométrique, elle a, en revanche, donné lieu également à une diminution du prix de revient des transports, et cela par suite de la meilleure utilisation du matériel et de la diminution des prix de manutention. Le prix de revient du transport d'une tonne à un kilomètre a été, en 1873, 1874 et 1875, de 3,56, 3,67 et 3,53 centimes; ce prix de revient n'a atteint, en 1879, 1881 et 1884, que les chiffres de 2,93, 2,83 et 2,79 centimes. L'augmentation de l'intensité du trafic des marchandises par kilomètre a contribué, dans une certaine mesure, à cette diminution du prix de revient.

Aussi, quoique le tarif moyen ait baissé, par suite de la diminution du prix de revient, le coefficient d'exploitation, c'est-à-dire la dépense d'exploitation faite pour obtenir une recette de 100 francs, est inférieure, pendant la période qui a suivi 1877, au coefficient d'exploitation de la période antérieure à 1877. Le coefficient d'exploi-

tation a atteint, pendant les années 1873, 1874 et 1875, les valeurs respectives de 61,81, 63,84 et 58,83, soit en moyenne de 61,5 p. 100; ce coefficient s'est élevé, en 1879, 1881 et 1884, respectivement aux chiffres de 53,6, 52,9 et 54,3, soit en moyenne de 53,6.

Pour obtenir une recette de 100 francs, il a fallu, pendant la période étudiée, antérieure à 1877, une dépense d'exploitation de 61f,50, et pour la moyenne des trois années étudiées, postérieures à 1877, une dépense d'exploitation qui ne s'élevait qu'à 53f,60.

Si l'on examine, en dernier lieu, quel a été le taux de l'intérêt que le produit net de l'exploitation a permis de servir au capital de premier établissement, on constate que, si l'on multiplie le taux de l'intérêt par le coût moyen de premier établissement d'un kilomètre, ce qui représente le produit net kilométrique, on arrive, pour les années 1873, 1874 et 1875, respectivement aux chiffres proportionnels de 15,6, 15,0 et 16,4, et pour les années 1879, 1881 et 1884, aux chiffres respectifs de 14,4 15,2 et 15,4; il y a une diminution du produit net, par kilomètre, en 1879; mais, pour les années 1881 et 1884, le produit net moyen est égal au produit net moyen des deux années 1873 et 1874. Le produit net très élevé relatif à l'année 1875 est dû au relèvement de 20 p. 100 opéré en 1874 sur les tarifs de marchandises.

En résumant, on peut donc dire que l'application du nouveau tarif allemand a amené des résultats financiers qui sont à considérer comme à peine satisfaisants. L'essai tenté dans la voie du *tarif au wagon* n'a pas été défavorable, sans donner toutefois de résultats bien remarquables; aussi n'y a-t-il pas à craindre que, dans l'avenir, le système actuel des tarifs allemands s'éloigne encore du système des tarifs de classification. Il y a plutôt lieu de supposer que le contraire se produira.

Si l'essai du système actuel des tarifs allemands, au lieu

de correspondre à une époque de grand développement industriel et commercial et d'augmentation dans l'intensité du trafic des chemins de fer, avait été entrepris à un moment de stagnation des affaires, il est certain que les résultats économiques et financiers dus à l'application de ce système auraient pu devenir désastreux pour le fisc des divers États de l'Allemagne. Il paraît probable aussi que, dans le cas où le mauvais état actuel des affaires viendrait à continuer et même à s'accentuer, les résultats financiers que donnerait le système des tarifs allemands pourraient encore devenir insuffisants et amener des remaniements de ce système.

Paris, en mars 1887.

ANNEXE.

NOMENCLATURE DES MARCHANDISES DES TROIS TARIFS SPÉCIAUX.

Les trois tarifs spéciaux sont, à proprement parler, des classes générales de marchandises par wagons complets de 10 tonnes s'appliquant à des articles dénommés.

Nous donnons ci-après la nomenclature des marchandises contenues dans chacun des trois tarifs spéciaux.

Tarif spécial I.

Rognures et déchets de plomb et de métaux communs;
Alun, alun ammoniacal, crin d'Afrique;
Feutre d'asphalte, feutres pour toitures;

Instruments aratoires;

Coton brut, déchet de coton, de cotons filés et twiste, de laine, de chanvre;

Noir d'os, charbon d'os, spodium (non compris le noir d'os et le spodium qui a servi, et qui est destiné à être employé comme engrais);

Plomb en saumons, en barres, en plaques et rouleaux (plomb laminé), fils de plomb, plomb étamé, litharge, cendre de plomb (crème), céruse, minium, oxyde de plomb, rognures de plomb, balles en plomb (vieilles), grenaille, tuyaux de plomb;

Vieux métaux communs, vieux canons, vieux bronze en morceaux, articles de cuivre et laiton cassés en morceaux, non compris le vieux fer et acier (voir fonte de fer et fer brut);

Chlorure de baryum, chlorure d'aluminium, chlorure de calcium (cet article n'est accepté que dans des tonneaux solides et étanches);

Chlorure de magnésium;

Chlorure de zinc, chlorure de fer, chlorure de chaux;

Noix de cocos, amandes de palmier, frênes;

Carton pierre, carton pour toiture, carton goudronné;

Bois exotiques en blocs, planches, poutres;

Chaudières et réservoirs en fer; machines à battre;

Glands;

Fers et aciers ouvrés de toute espèce non dénommés dans la classification des tarifs spéciaux II et III (*);

Terre et chaux à blanchir;

Outils de la voie de chemin de fer, tels que pioches, pics, pelles, bêches, brouettes, tombereaux;

Écorces et substances diverses servant au tannage;

Bois de teinture en billes, en bûches, moulu, effilé et en copeaux;

Céréales de toute espèce, comprenant le froment, le seigle, l'orge, l'avoine, le maïs, le millet, le sarrazin, les légumes secs et les graines oléagineuses de toute espèce; déchets de céréales;

Verres, tels que verres à vitres, verre affiné, verre brut et plaques de verre non poli;

Graines fourragères;

(*) Nous ferons remarquer qu'une annexe à la classification des trois tarifs spéciaux énumère les articles ouvrés en fer ou en acier qui sont à tarifer à la taxe du tarif spécial n° I. Cette annexe contient une longue liste d'articles, et s'applique à presque tous les objets de quincaillerie, de coutellerie, etc.

Chanvre;

Résine et poix, galipot non purifié, à l'exception de la térébenthine et des résines comprises dans les articles de droguerie: colophane;

Harengs;

Bois exotiques débités en planches, madriers et billes, non compris le bois de placage et les bois de construction exotiques (pour ces derniers voir le tarif spécial II);

Vinaigre de bois, acide pyroligneux, alcool de méthyle;

Tuyaux en bois, articles en bois teints, vernis, laqués, polis, dorés, argentés ou bronzés;

Perches à houblon;

Tuyaux de condensation;

Fécule de pommes de terre;

Pierres lithographiques;

Malt;

Pièces de machines en fer ou en acier, et pièces de machines dont les parties principales sont en fer ou en acier;

Eaux minérales naturelles ou artificielles, sans distinction des emballages;

Farines de toute espèce (de blé, d'épeautre, semoules, sons, gruaux, orge perlé);

Eaux de lessive, eaux mères;

Orseille;

Papier d'emballage de toute espèce, papier de paille pour emballages, sacs et cornets de papier collés, en paquets ou en ballots liés;

Rognures de papier (déchets de papier) solidement liés ou en ballots;

Piassava brut;

Briquettes de charbon pour le chauffage des voitures de chemins de fer;

Riz, son de riz, poudre de riz, farine de riz;

Cornues en chamotte et en argile;

Sucre brut (polarisation inférieure à 98 p. 100), mélasse;

Semences de toutes sortes, en sacs ou en tonneaux;

Acide sulfurique;

Poussière de houille lavée;

Soufre et fleur de soufre, sulfure de baryum;

Soude brute, calcinée et cristallisée, non compris le bicarbonate de soude, cendres pour fabriquer le savon;

Amidons de toute espèce;

Pâtés de paille et cartons de paille en paquets ficelés et en ballots;

Sumac;

Brai, non compris les goudrons de houille et de lignite;

Glucose, sucre de fécule et sirops de glucose et de fécule;

Laines de toute espèce et déchets de laine;

Zinc en blocs, zinc laminé, en plaques, potée de zinc, oxyde de zinc;

Chlorure de zinc;

Sucre de toute espèce pour l'exportation.

Tarif spécial II.

Essieux et bandages pour matériel de chemin de fer;

Flacons médicaux, bouteilles et verres à bière;

Asphalte brute, asphalte comprimée, bitume, cire minérale, poix de goudron minéral;

Charbon d'asphalte;

Noir animal, balais;

Magnésie, carbonate de magnésie;

Blocs de bois pour freins;

Pièces de pont en fer;

Huiles minérales lourdes en tonneaux;

Cellulose;

Ciment, pierres, briques, dalles et carreaux en ciment, mortiers de ciment de toute espèce;

Fils de fer et d'acier;

Fers façonnés de toutes sortes et laminés, tels que :

(1) Fer et acier pour essieux, fer feuillard, fers en barres, méplats à T et en U;

(2) Tôles de fer et d'acier, tôles pour chaudronnerie, plaques de fer ou d'acier, fer-blanc, fil d'acier ou de fer;

(3) Tuyaux et colonnes en fer et en acier, rails neufs pour chemins de fer, pour usines et pour voies en général, accessoires de rails (petit matériel de la voie), tels que plaques, coussinets, crampons, éclisses, boulons, écrous, traverses en fer;

(4) Pièces de locomotives et de wagons;

Sulfate de fer, talc, verres à couleurs, en tonneaux ou en caisses;

Nerfs et tendons d'animaux;

Graphite (plombagine);

Bouteilles vides, gobeleterie en verre, articles ordinaires en verre;

Fruits et légumes;

Bois, à l'exception de ceux du tarif spécial n° 1, bois d'œuvre et de construction, merrains, douves, cotrets, fagots, fascines, osier, balais de bouleau et de bruyère, bois de charronnage façonné, bois à fusils ébauchés, caisses assortimentées et emboîtées, bois feuillards et cercles, bois cintrés, chevrons, madriers, planches, poteaux, clous de navire, chevilles en bois, bois préparés tels que poteaux de télégraphe et planches pour boîtes à cigares;

Poils de bêtes, à l'exclusion des soies et du crin;

Bois effilés pour fabrication d'allumettes, clous et pointes en bois;

Chanvre, lin;

Farine et bois, pâte de bois sèche et humide, sciure de bois;

Houblon (voir les conditions réglementaires du tarif général);

Jute;

Chaux calcinée;

Sabots de bétail;

Os et os concassés, charbon d'os;

Son;

Liège;

Oriolythe moulue et en morceaux (alumine fluatée alcaline);

Choux, navets;

Rognures de cuir;

Chiffons;

Magnésie brute;

Marbre ouvré sans emballage et liteaux, blocs de marbre en tranches et dalles;

Mélasses (sirop de betterave non raffiné);

Tourteaux et farines de tourteaux de toute espèce, notamment farines et tourteaux de lin, farines et tourteaux de noix de cocos (résidus des filaments de noix de cocos après l'extraction de l'huile), meules composées;

Coquillages de toutes sortes;

Pouzzolane (strass de Sicile), poix minérale;

Naphtaline;

Ocre en tonneaux ou en caisses;

Eau de mer;

Déchets de papier, plaques d'asphalte, roues de matériel de chemin de fer;

Emeri;
Cendres de savonnerie non lessivées;
Lessive caustique de savonnerie;
Amidon humide;
Oignons comestibles;
Pierres taillée, à l'exception de celles énumérées au tarif spécial n° III;
Poterie de grès et d'argile, faïences, briques et carreaux de faïence, argile en pains pour fabriques de produits chimiques;
Pâte de paille sèche et humide;
Talc brut, stéatite, terre à foulon;
Objets en argile, en ciment non dénommés, en vrac;
Trass;
Drèches et marcs;
Vitriol vert;
Osier;
Verre soluble, solide et liquide (n'est accepté que dans des tonneaux solides et étanches).

Tarif spécial III.

Déchets de liège, de feutre, de chiffons, de betteraves, de fer-blanc, de fer, d'acier, de peaux, de corne, de jute, d'os;
Ecorces brutes et moulues;
Alfa;
Cendres pour engrais;
Asphalte comprimé, ciment d'asphalte, mastic d'asphalte, terre et pierres d'asphalte;
Flegmes de distillerie (blanquettes et rinçures);
Lignites, coke de lignite, agglomérés de lignite;
Manganèse, sulfate de magnésie, magnésie caustique;
Racine de chicorée;
Ciment, pierres, dalles, auges, etc., en ciment;
Tuyaux de drainage;
Engrais de toute espèce, engrais de fosse d'aisances, sulfate d'ammoniaque, cendres à l'exception des cendres dénommées spécialement, engrais de sang et sang pulvérisé, salpêtre du Chili (nitrate de soude); chlorate de potasse, fumier, engrais de poisson, de viande, chaux d'usines à gaz, eaux d'usines (rinçures et eaux ammoniacales), guanos de toute espèce, plâtre et platras, cornes et sabots en poudre, potasses, engrais à base de

potasse, chaux et sels calcaires, cendres d'os, noir pour engrais os en poudre, résidus calcaires des fabriques de sucre, coprolithes, chiffons pour engrais, phosphates, phosphorites moulues et en morceaux, poudrette, suie (le noir de fumée non compris), résidus de marcs de distillerie, poussières et balayures de laine;

Glace (eau congelée);

Fontes de fer et d'acier, fer massé, ébauché, loupes en massiaux, en paquets ou prismes, ferrailles, riblons, vieux rails, vieux projectiles en fer, acier cassé et rognures, limaille;

Emballages de toute espèce ayant servi;

Terres ordinaires, gravier, sable gros et fin, marne, terre glaise, argile, kaolin, terre à pipe, terre bitumineuse ordinaire et comprimée en pains, terre d'Amberg, schlick, terres broyées, boues de rivières et d'égouts (sont exceptés la terre à foulon et le talc), terres à infusoires;

Terres colorantes en sac ou en vrac;

Minerais ordinaires, y compris : blende (minerai de zinc), galène, plomb sulfuré, calamine, mine de cobalt, mattes de cuivre, fer à demi affiné des fourneaux (loupe) et pyrites;

Herbes fourragères, vertes;

Cendres de plomb, scories de plomb;

Voitures et équipages de toutes sortes non chargés de marchandises ne pouvant pas être transportées par wagon couvert;

Terre de graphite, brute ou pulvérisée;

Fourrages verts;

Plâtre cru, cuit et moulu;

Battitures et scories de forges (non compris les battitures et cendres de cuivre);

Filasses de coton et déchets de filés;

Bois de chauffage, jusqu'à 2 mètres 1/2 de longueur, bois et troncs d'arbres jusqu'à 6 mètres de longueur;

Traverses de chemins de fer imprégnées ou non, sciure de bois, copeaux, déchets de bois;

Charbon de bois;

Chaux, pierre à chaux;

Pommes de terre;

Pommes de pin, de sapin et de mélèze;

Craie brute en morceaux et moulue, craie lavée;

Tan et mottes de tan, créosote, huile de créosote;

Germes de malt;

Os, os nettoyés et en morceaux, farine d'os;
Blocs de marbre brut;
Huiles minérales;
Pulpes de betteraves et résidus de raffinerie de sucre;
Betteraves, betteraves coupées, rognures de betteraves;
Sel, sel de cuisine, déchets de sel raffiné, sel gemme, sel de Glauber, en vrac et en sac;
Débris de poterie de grès, de verre, de porcelaine, de moules, coquilles, chamotte, groisil;
Ocres en sac ou vrac;
Ardoises;
Laitier et mâchefer;
Fraisil de laitier, suies;
Cendres de savonneries lessivées;
Spath (feldspath, baryte, spath-fluor), strontiane;
Pierres :

(*a*) Briques et tuiles ordinaires, briques réfractaires, chamottes, pierres artificielles, carreaux et pavés en ciment, en grès;

(*b*) Moellons et pierres de taille bruts, pierres à plâtre, pavés piqués ou ébauchés, pierre à chaux, tuf, basalte, lave, pierres et cailloux roulés, concassés, briques cassées, dalles de pierre (excepté celles de marbre), pavés, pierres pour bordures de trottoirs, de routes, pierre ponce, quartz, silex, pierre de basalte, tuf;

(*c*) Pierres meulières naturelles (les pierres meulières artificielles sont tarifées au tarif spécial n° I).

Houilles et cendres de houilles, briquettes, coke, cendres de coke, agglomérés de houille et coke, tourbe et tourbe comprimée en pains;
Etoupe et déchets d'étoupe;
Goudron, huile de goudron;
Briques pilées;
Marc de raisin.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE V.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

ANNEXE.

NOMENCLATURE DES MARCHANDISES DES TROIS TARIFS SPÉCIAUX.

CHRONIQUE

(Juillet 1887)

N° 43

Navigation du Rhône.

Les travaux d'amélioration du Rhône au moyen d'épis noyés touchent à leur terme. Le tableau ci-après indique les progrès réalisés successivement depuis 1878, où le système suivi fut proposé par M. l'Inspecteur général Jacquet, alors Ingénieur en chef du service.

SEUILS PRÉSENTANT AU PLUS BAS ÉTIAGE UN MOUILLAGE	NOMBRE DE CES SEUILS EN 1878	1882	1884	1887
Inférieur à 0,50	5	»	»	»
— à 0,60	8	»	»	»
— à 0,70	19	»	»	»
— à 0,80	22	»	»	»
— à 0,90	30	4	1	»
— à 1,00	40	7	5	»
— à 1,10	63	12	8	2
— à 1,20	81	18	10	3
— à 1,30	91	25	16	7
— à 1,40	101	42	31	16
— à 1,50	111	55	51	38

Ce tableau, toutefois, ne donne pas une idée suffisamment nette des améliorations obtenues, parce que le niveau par rapport auquel le mouillage est compté est celui du plus bas étiage connu, étiage qui ne se réalise presque jamais et dure à peine. En outre, les facilités qui résultent de la bonne direction imprimée au chenal permettent de naviguer avec un état des eaux qui aurait été autrefois insuffisant. Ainsi la navigation s'arrêtait tout à fait, en 1876, lorsque les eaux étaient à $0^m,80$ au-dessus de l'étiage.

Elle n'a cessé :

En 1878, qu'à.	0,73	au-dessus de l'étiage
En 1880, à.	0,60	—
En 1882, à.	0,35	—

En 1883, elle n'a pas cessé; il en a été de même en 1885, 1886 et 1887 jusqu'à présent. En 1884 seulement, qui a été, on se le rappelle, une année exceptionnelle, elle n'a cessé qu'au niveau de l'étiage, et pendant une très courte période.

Enfin, il est permis de dire que les bateaux, avec leur chargement habituel, qui varie de 1 à 1m,40, trouveront, lorsque dans un avenir prochain les cinq seuils les plus élevés seront écrêtés, leur passage libre :

Avec un tirant d'eau de.	1m,20	toute l'année
— de.	1 ,40	358 jours

Et si contrairement à leurs habitudes, ils veulent charger à 1m,60, ils trouveront encore 345 jours par an où ils pourront naviguer avec ce chargement exceptionnel. Ceci est le résultat acquis déjà; et l'on compte bien qu'avant peu, le succès sera encore plus complet.

Il y a loin de là aux chômages de trois mois qui se présentaient autrefois, et aux chargements compris entre 0m,80 et 1m,20 de tirant d'eau qu'on était obligé fréquemment d'imposer aux bateaux. On est donc en face d'améliorations très notables et il est permis d'espérer qu'avec un emploi judicieux des ressources qui restent, on obtiendra ce qu'on avait espéré obtenir, c'est-à-dire une absence complète de chômage sous le chargement normal, et presque complète sous des chargements exceptionnels que le matériel existant ne permet pas, du reste, de réaliser.

Le canal de la mer du Nord à la Baltique.

C'est le 3 juin que l'empereur d'Allemagne a assisté à la pose de la première pierre de la première écluse du canal qui reliera la mer du Nord à la mer Baltique, par le Sleswig-Holstein. La cérémonie a eu lieu à Holtenau, dans la baie de Kiel. Une somme de 156 millions de marks a été votée par le Reichstag à la condition que le royaume de Prusse s'engage à verser à lui seul la somme de 50 millions de marks, comme étant la partie de l'Allemagne qui devait le plus profiter de la construction de ce canal. Le gouvernement allemand ne craint pas d'avouer que cette entreprise a plutôt sa raison d'être au point de vue militaire qu'au

point de vue commercial. Dans ce but, une somme de 1 million de marks a été réservée pour élever des fortifications du côté de la mer du Nord.

La construction du canal sera grandement facilitée sur une partie de sa longueur, de 98 kilomètres, sur le versant de la mer Baltique. La largeur du canal sera de 60 mètres au niveau de l'eau et de 26 mètres au plafond, avec une profondeur normale de $8^{m},50$. La coupe transversale donne une surface d'eau de $365^{m^2},5$, soit 6 fois la maîtresse section immergée des plus grands navires appelés à passer par le canal, ces navires calant 6 mètres, ayant 12 mètres de large et $61^{m^2},2$ de maîtresse section immergée. Le canal, mesuré à la hauteur des petits fonds de ces navires, a une largeur de 36 mètres, ce qui permettra à deux navires de cette dimension de se croiser, sans être obligés de se garer. La profondeur de $8^{m},50$ est suffisante pour laisser passer les plus grands navires de guerre actuels.

On estime que l'entretien du canal reviendra à 2.000.000 de marks par an et qu'il sera traversé par 18.000 navires jaugeant ensemble 5.500.000 tonnes. La taxe à payer par les navires devant être de $0^{mark},75$ par tonne (y compris le pilotage, le remorquage et l'éclairage), on compte sur un revenu de 4.125.000 marks.

Le nombre des navires passant par le Sund est de 35.000 par an; sur ce nombre on compte 200 naufrages. Le passage par le canal aura donc l'avantage de diminuer les pertes de navires.

Un navire partant de Hambourg pour Cronstadt économisera 424 milles de route; en partant de Brême, il parcourra 322 milles de moins et en partant d'Anvers 236. L'ingénieur de ce nouveau canal est M. Dahlstrom, de Hambourg, dont le plan a été choisi de préférence à trois autres projets rivaux présentés par d'autres ingénieurs allemands.

Tous les ouvriers à employer devront être Allemands. Les entrepreneurs auront chacun leur portion de canal à compléter, car le gouvernement n'a pas voulu donner l'entreprise à un seul. Bien que ce canal maritime ne soit pas à comparer avec ceux de Suez et de Panama, il n'en constituera pas moins une des grandes entreprises de la fin du XIXe siècle.

Le port de Folkestone.

La cérémonie de la pose de la première pierre de la nouvelle jetée-promenade du port de Folkestone a eu lieu le 7 mai. Cette

jetée part du centre de la plus belle partie de la ville : son entrée comporte deux élégants bureaux de péage surmontés d'un kiosque à cadran et réunis par une vérandah couverte.

La longueur de la jetée, y compris ses approches, est de 208 mètres et sa largeur de 9^{m},44 ; à chaque tiers de sa longueur, la jetée élargie est par deux sortes de balcons demi-circulaires, ce qui porte la largeur à 18^{m},30 dans ces deux endroits. L'extrémité de la jetée a une largeur de 31^{m},70 et une longueur de 33 mètres environ. C'est là que s'élèvera un magnifique pavillon construit avec une charpente en fer soutenue par des colonnes en fer forgé de 0^{m},305 de diamètre, espacées les uns des autres de 4^{m},60 à 6^{m},10. Les pilots à vis supportant le tablier de cette jetée sont enfoncés dans le sol à une profondeur de 3 mètres à 3^{m},70. Le pavillon aura 31 mètres de long sur 18^{m},30 de large et sera pourvu de banquettes ; 700 personnes pourront s'y asseoir commodément. De plus, un grand nombre de bancs seront établis tout le long de la jetée de façon à ce que 1.200 ou 1.400 personnes y trouvent place.

Le pavillon sera disposé de façon à ce que l'on puisse y donner des concerts ; des salles de rafraîchissements, des cabinets de toilette, etc., seront à la disposition des visiteurs. Un débarcadère construit à l'extrémité de la jetée permettra aux paquebots de la localité de venir y embarquer et y débarquer leurs passagers à toute heure de marée.

Les entrepreneurs de cette jetée sont MM. Heenan et Froude de Manchester qui doivent avoir terminé leur travail au mois d'août prochain. Cette construction a été adjugée 517.500 francs.

Le port d'Ardrossan.

Ce port de la côte ouest d'Écosse et dont le commerce principal est l'exportation du charbon et l'importation des minerais de fer pour les hauts fourneaux des environs, vient d'entreprendre de grands travaux qui doivent être terminés dans deux ans et demi et vont lui donner une grande importance. Un brise-lames de 600 mètres abritera le mouillage extérieur des navires, un nouveau bassin de 4 hectares de superficie et de 8^{m},20 de profondeur permettra aux plus grands navires d'y rester à flot à toute heure de marée. On construira également un bassin de marée de 2 hectares de superficie qui aura 5^{m},50 de profondeur à mer basse et 8^{m},20 à mer haute. De nouveaux quais munis d'appareils hydrauliques et desservis par des voies ferrées complète-

ront ces travaux d'amélioration dont le prix de revient est estimé à 4 millions de francs.

Le port de Bilbao.

La canalisation de la rivière Nervion, depuis Bilbao jusqu'à la barre située à son embouchure (distance de 13.500 mètres) et la prolongation sur une longueur de 800 mètres du quai du sud-ouest à Portugalete sont actuellement terminées.

Jusqu'à ce jour, les travaux effectués ont coûté 18.750.000 fr. et ont eu pour résultat de donner une plus grande hauteur d'eau sur la barre et de rectifier le chenal intérieur, ce qui permet aux navires calant 4^{m},90 de remonter jusqu'aux quais de Bilbao et à ceux de 5^{m},50 de pouvoir franchir la barre pendant les marées de morte eau comme ceux de 6^{m},70 peuvent la passer pendant les marées de vive eau.

Néanmoins comme l'entrée de la rivière est impraticable pendant les coups de vent du nord-ouest, il est nécessaire d'établir un port de refuge à l'entrée, dans le genre de celui qui a été proposé par M. Charles Vignoles, ingénieur, et qui coûterait près de 32.000.000 de francs. — Malgré ces grands travaux et l'amélioration obtenue, le port de Posajes, situé non loin de là et qui est beaucoup plus facile d'accès, grâce à sa belle situation naturelle, au fond d'une baie parfaitement abritée, menace de supplanter Bilbao pour l'exportation des minerais d'Espagne.

N° 44

NOTICE

SUR

LA VIE ET LES TRAVAUX

DE

M. CH. FOURNIER

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

Par M. GAUCKLER, Inspecteur général des ponts et chaussées.

Le corps des ponts et chaussées, si éprouvé dans ces derniers temps, vient de faire une nouvelle perte. M. Charles Fournier, inspecteur général de 2e classe, est mort le 7 mars 1887, dans sa propriété de Chamalières, près Clermont-Ferrand.

M. Fournier (Charles-Antoine) était né à Saint-Gorgon, près de Rambervillers (Vosges), le 10 juin 1822. Son père, maître de forges, dut abandonner son industrie par suite de la substitution de la houille au charbon de bois dans la fabrication du fer. Toutefois, ce passé industriel semble avoir déterminé la carrière de ses fils, qui, tous les trois, ont su conquérir des positions éminentes dans l'industrie des chemins de fer.

L'aîné, M. Edouard Fournier, qui était destiné à prendre la direction de l'usine paternelle, dut changer de carrière. Il entra, en 1846, dans le service des ponts et chaussées avec le grade de conducteur. Après avoir passé par la compagnie de l'Est et fait des travaux en Espagne,

il revint apporter à son pays natal le fruit de son expérience. Il est mort à Épinal, le 2 mai 1881, directeur du réseau d'intérêt local des Vosges, qu'il avait construit et organisé d'une manière tout à fait remarquable.

Le plus jeune, M. Eugène Fournier, est aujourd'hui inspecteur général des chemins de fer Autrichiens, chargé du service d'entretien de la voie.

M. Charles Fournier, après des études brillantes aux collèges de Saint-Dié et d'Épinal, sortit du collège royal de Metz pour entrer à l'École polytechnique en 1841. Admis à l'École des ponts et chaussées en 1843, il fit deux missions, dans la Lozère et dans la Marne. Le 1er août 1846, il fut chargé, dans la Haute-Loire, du service de l'arrondissement de l'ouest à la résidence de Brioude, comprenant, outre les routes, la navigation de l'Allier, et, à partir de 1849, les chemins vicinaux. Le jeune ingénieur déploya une activité remarquable et une grande intelligence pratique dans de nombreux projets de rectifications de route, suivis d'exécution, dans l'établissement de barrages sur l'Allier et dans des travaux de défense de rives de cette rivière. En 1853, il fut chargé, en outre, de dresser les avant-projets du chemin de fer d'Arvant au Puy, avec variante d'Arvant au confluent de la rivière d'Ance, dans la Loire, et de Brioude vers Alais, par les gorges de l'Allier.

Entre Arvant et le Puy, M. Fournier résolut un problème de pentes très difficile, par l'emploi d'un tracé hélicoïdal, le premier qui ait été projeté en France et ait reçu l'approbation du Conseil général des ponts et chaussées (*).

En dix ans, la réputation du jeune ingénieur avait grandi, au point qu'il fut choisi par M. l'inspecteur gé-

(*) Ce tracé a été supprimé par la Compagnie concessionnaire, qui lui a substitué un autre tracé, en portant la pente de 0m,016, maximum prescrit pour les études, à 0m,022, afin de réaliser une économie sur la construction.

néral Busche, chargé d'organiser le personnel du service de construction du réseau du Nord d'Espagne, pour faire partie de cette phalange d'ingénieurs français qui allaient soutenir, à l'étranger, le renom de science et de probité du corps des ponts et chaussées.

Muni d'un congé illimité, M. Fournier put, à partir du 15 mars 1856, donner essor à son activité dans les fonctions d'ingénieur en chef de la 1re section du chemin de fer du Nord d'Espagne, et, à partir de 1860, dans celles de directeur de l'exploitation des parties successivement ouvertes sur l'ensemble du réseau.

Il a étudié et fait exécuter en Espagne 312 kilomètres de chemins de fer et organisé l'exploitation de 378 kilomètres. De ces travaux, le tracé de Madrid à Valladolid (250 kilomètres) est cité dans l'ouvrage de M. l'inspecteur général Couche, parmi les tracés remarquables de chemins de fer. Entre Madrid et Avila, la chaîne du Guadarrama a été franchie avec des déclivités qui n'ont pas dépassé 15 millimètres, bien que la voie dût s'élever jusqu'à la cote 1.350 mètres.

Il serait trop long de citer tous les ouvrages d'art que comporte ce chemin de fer. Mais nous devons rappeler qu'ils ont été exécutés dans un pays neuf, entièrement dépourvu de ressources pour les grands travaux, et où il a fallu tout créer.

C'est pendant son séjour en Espagne que M. Fournier s'unit à cette femme si distinguée, dont la grâce et le dévouement ont fait le charme de son intérieur, le bonheur de sa vie. C'est à cette époque que lui est né ce fils unique, officier d'artillerie, qui, dans une autre carrière, promet de marcher sur les traces de son père. C'est en Espagne, malheureusement aussi, qu'il contracta le germe de ces douloureuses maladies, qui ont, à plusieurs reprises, mis un frein à son ardeur, sans altérer son activité.

Rentré en France en 1862, M. Fournier fut chargé du service ordinaire de l'arrondissement de l'ouest du Puy-de-Dôme, à la résidence de Clermont. A de nombreux travaux concernant le service ordinaire, il joignit les études des chemins de fer d'intérêt local de Maringues à Riom, à Gerzat, à Pont-du-Château et à Puy-Guillaume.

En 1864, il réunit à son service le contrôle de la construction du chemin de fer de Brioude à Alais et au Puy, et, à partir de 1868, les études du projet de tracé et de terrassements du chemin de fer de Clermont à Tulle, avec embranchement d'Eygurande à Vendes.

Nommé aux fonctions d'ingénieur en chef à Clermont, le 1er septembre 1870, il en obtint le grade le 16 juin 1872. Son nouveau service comprenait les travaux et les études de l'infrastructure du chemin de fer de Vichy à Ambert (18 kilomètres) concédé à la compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée. Ce chemin de fer comporte 5 grands ponts, 4 viaducs, 11 tunnels et 7 kilomètres de murs de soutènement fondés en lit de rivière. Tous ces travaux présentaient de nombreuses difficultés, surtout pour les fondations; elles furent heureusement vaincues.

A partir de 1877, M. Fournier fit les études des projets de chemins de fer de la ligne d'Ambert à Darsac (62 kilomètres), de la ligne de Montluçon à Eygurande (92 kilomètres), des lignes de Saint-Éloi à Pauniat avec embranchements de Gouttières à Létrade (85 kilomètres), de Laqueille au Mont-Dore (15 kilomètres), et de Neussargues vers Saint-Étienne (95 kilomètres). Ces projets furent successivement approuvés par le Conseil général des ponts et chaussées.

En 1878, M. Fournier fut chargé, en outre, du contrôle et du règlement des travaux de la compagnie du chemin de fer de Clermont à Tulle, racheté par l'État. Cette partie du service fut l'objet de ses continuelles préoccupa-

tions. Les travaux étaient exécutés d'après un marché à forfait et nécessitaient une surveillance rigoureuse et incessante.

De 1880 à 1882, le contrôle de l'exploitation des chemins de fer de l'État (3e section) fournit de nouveaux aliments à son activité.

Le 1er avril 1882, M. Fournier fut nommé inspecteur général de 2e classe et chargé de l'inspection des travaux à exécuter sur les réseaux de l'Est et du Nord (17e inspection) concernant surtout l'intérêt de la défense du territoire et de la mobilisation.

Pour rendre compte de l'importance de cette tâche, il suffit de citer le nombre et la longueur des lignes livrées à l'exploitation pendant sa durée :

En 1882, huit lignes ouvertes à l'exploitation sur une longueur de 238 kilomètres ;

En 1883, sept lignes d'une longueur totale de 148 kilom.;

En 1884, sept lignes d'une longueur totale de 252 kilom.;

En 1885, dix lignes d'une longueur totale de 360 kilom.;

En 1886, trois lignes d'une longueur totale de 147 kilom.;

Soit un total de trente-cinq lignes, longueur d'ensemble de 1.145 kilomètres.

Enfant d'un département de la nouvelle frontière, M. Fournier apporta à l'examen des questions relatives au réseau stratégique le patriotisme le plus ardent.

Pendant une carrière si remplie, les encouragements et les récompenses honorifiques n'ont pas manqué à l'éminent ingénieur. Décoré de l'ordre de Charles III d'Espagne, le 22 septembre 1858, il fut nommé commandeur du Nombre extraordinaire d'Isabelle la Catholique, le 17 octobre 1861. En 1864, les études de rectification de la route nationale n° 141 (Puy-de-Dôme) ont été très remarquées par le Conseil général des ponts et chaussées, qui a provoqué, à leur sujet, les témoignages de satisfaction de l'Administration, suivis, le 13 août 1865, de la

décoration de la Légion d'honneur. Le 12 novembre 1879, M. de Freycinet, alors ministre des travaux publics, lui adressa une lettre de félicitations, au sujet des études de la ligne de Montluçon à Eygurande et de celle d'Ambert à Darsac. Enfin, le 8 juillet 1885, le ministre de la guerre récompensa son dévouement en le nommant officier de la Légion d'honneur.

Pendant qu'il accomplissait ses devoirs d'ingénieur, M. Fournier trouvait le moyen de se rendre utile à ses concitoyens, dans des travaux d'un autre genre. Tout jeune, à Brioude, il organisa la compagnie des pompiers, dont il fut le capitaine. A Chamalières, comme membre du conseil municipal, les soins qu'il donna aux écoles et à la voirie communale, ont laissé dans la commune un souvenir plein de reconnaissance.

D'un tempéramment ardent et vif, tempéré par une grande bonté, M. Fournier a su grouper autour de lui des amitiés durables par l'aménité de ses manières, la sûreté de ses relations, la rectitude de son jugement et la loyauté de son caractère. De tous ses collaborateurs, chefs ou subordonnés, il savait se faire des amis. Modeste jusqu'à la fin, ses dernières volontés ont interdit tout discours sur sa tombe. M. le maire de Chamalières seul a pu lui dire un adieu attendri et déposer sur le cercueil un souvenir pieux de la reconnaissance de sa commune. Ne regrettons pas ce silence obligé, les larmes aussi ont leur éloquence.

M. Fournier est mort, on peut le dire, au champ d'honneur, dans la foi du chrétien, attendant d'une autre vie la récompense de ses labeurs et de ses vertus. En mourant, il a laissé à sa famille un héritage d'honneur et, à ses camarades, des exemples de probité dans le travail, de loyauté et de désintéressement, dont le souvenir ne sera pas perdu.

Avril 1887.

N° 45

NOTICE

SUR LA RÉPARTITION DU TRAFIC

DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS

ET

SUR LES PRIX DE REVIENT DES TRANSPORTS

Par M. RICOUR,
Inspecteur général des ponts et chaussées.

EXPOSÉ.

Les voies de communication se multiplient et s'améliorent spontanément, lorsque la prospérité matérielle se développe, et tout progrès, ainsi réalisé dans les moyens de transport, provoque un accroissement d'activité dans le mouvement commercial.

Si l'on étudie le réseau des voies de terre, on reconnait une relation évidente entre l'état de perfection des voies et l'importance de la circulation qu'elles desservent.

Les grandes routes nationales, d'une part, et les chemins ruraux, d'autre part, témoignent que *les difficultés* et par suite *les dépenses de transports sont d'autant moindres* que la circulation est plus dense. — L'outil est proportionné au travail qu'il doit produire.

Les Chemins de fer, considérés isolément, ne présentent pas entre eux les différences si frappantes des voies de terre : machines, véhicules, rails ont partout même aspect; mais les dépenses des transports n'en varient

pas moins avec l'importance du trafic, et nous cher-cherons dans le *chapitre* 1 de la présente notice à dégager *la loi de ces variations*, en condensant sous forme graphique les données de la statistique qui en sont la manifestation expérimentale.

Dans le chapitre 2, nous signalerons quelques conséquences remarquables de cette loi, et nous en déduirons quelques règles simples, permettant de comparer, d'une manière rationnelle, les prix de revient des transports envisagés à un point de vue général, soit par exercices successifs pour la France entière, soit par grands réseaux pour un même exercice.

Cet examen nous conduira à rechercher, *dans le chapitre* 3, dans quelle mesure il est possible d'abaisser les dépenses d'exploitation des Chemins de fer. — Pour une branche de cette exploitation au moins, *la Traction*, les résultats acquis témoignent que des modifications peu coûteuses, introduites dans le matériel moteur et roulant, permettent de réaliser des économies considérables.

Dans la *conclusion*, nous mettrons en évidence la situation financière vers laquelle tendent, à bref délai, les réseaux français dans les conditions actuelles d'exploitation.

CHAPITRE I

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES COEFFICIENTS D'EXPLOITATION ET DES PRIX DE REVIENT DE L'UNITÉ DE TRAFIC.

Exploitation : recettes et dépenses. — *Le Bulletin du Ministère des travaux publics* (statistique et législation comparées) (*), publie depuis plusieurs années des docu-

(*) Ce *Bulletin* paraît le 15 de chaque mois depuis 1881. — Paris, Imprimerie nationale.

ments d'un grand intérêt, se rattachant à l'exploitation des Chemins de fer. Des tableaux détaillés font connaître, en quelque sorte, pour chaque maille des réseaux français, les recettes et les dépenses totales, les recettes et les dépenses kilométriques, et enfin le rapport p. 100 des dépenses aux recettes (impôt déduit).

Pour un ensemble de 27.000 kilomètres de Chemins de fer d'intérêt général, le *Bulletin* fournit ainsi, pour chaque année, plus de 200 résultats distincts s'appliquant chacun à une longueur moyenne de 130 kilomètres environ; les recettes par kilomètre varient depuis 1.300 francs jusqu'à 200.000 francs, et les dépenses depuis 6.000 francs jusqu'à 112.000 francs.

Lignes à grand trafic;

Lignes à faible trafic;

Lignes de montagnes à fortes déclivités;

Lignes des grands courants des vallées à faibles pentes et longs alignements;

Tout est analysé par tronçons, et réuni par réseaux, dans les tableaux publiés par le Ministère.

Un premier coup d'œil d'ensemble, jeté sur cet assemblage de renseignements statistiques, donne l'impression d'une complication inextricable où nulle loi de continuité n'apparaît.

Des lignes, pour lesquelles les recettes kilométriques sont comprises entre des limites rapprochées, présentent les écarts les plus grands pour les dépenses, et inversement. Mais l'ordre et la régularité se manifestent bientôt, lorsque, au lieu de considérer séparément les résultats d'une foule de petits tronçons, on classe les lignes par recettes kilométriques croissantes sans distinction de réseau, de manière à former des groupes moins influencés par les conditions locales.

Courbe des coefficients d'exploitation. — Voici sous

quel aspect se présentent alors (*fig.* 1) *les coefficients d'exploitation* mis en regard des recettes kilométriques croissantes.

Le coefficient d'exploitation d'un groupe de lignes est, on le sait, le rapport p. 100 des dépenses totales d'exploitation aux recettes de toute nature (impôt déduit).

Sur le diagramme (*fig.* 1), les divisions de la ligne des abscisses correspondent aux recettes par kilomètre exploité, à l'échelle de 2 millimètres par 1.000 francs de recettes; les ordonnées représentent les coefficients d'exploitation, à l'échelle de 1 millimètre pour 2 unités des nombres abstraits donnant la valeur de ces coefficients.

Le poids de chacun des points × × ×..., fixant l'extrémité d'une ordonnée du diagramme, est proportionnel à la longueur du groupe des lignes auxquelles il s'applique; sur le diagramme, cette longueur est figurée par une ordonnée pendante; 1 millimètre correspond à 100 kilomètres; elle est, en outre, inscrite numériquement au bas de chaque ordonnée pendante.

Citons un exemple :

Le point B de la courbe correspond au groupe de lignes ci-après, nº 28 du tableau A (*).

DÉSIGNATION	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales
Tergnier à Laon.	30	55.267	1.658.000	1.026.000
Moret à Roanne.	355	56.100	19.910.800	9.202.100
Bessèges à Alais.	33	56.600	1.867.300	904.100
Nimes au Teil.	119	58.000	6.901.600	2.386.400
Mâcon et Lyon à Genève (partie franç.)	220	58.800	12.938.400	7.654.400
Totaux.	757	57.161	43.271.100	21.173.000

La longueur totale de ce groupe de lignes, soit 757 kilomètres, correspond au *poids* du point B; ce *poids* est

(*) Voir ce tableau A, p. 187.

représenté par l'ordonnée pendante BC dont la longueur est de $7^{mm},57$.

La recette totale étant de

$$43.271.100^f,$$

la recette kilométrique est en moyenne :

$$\frac{43.271.100^f}{767} = 57.161^f.$$

Le pied A de l'ordonnée AB est déterminé par cette valeur 57.161 francs, représentée elle-même par la longueur de l'abscisse OA, à l'échelle de 2 millimètres par 1.000 francs.

La dépense totale étant de

$$21.173.000^f,$$

le coefficient d'exploitation, qui n'est autre chose que le rapport pour 100 de la dépense à la recette, a pour valeur :

$$\frac{21.173.000 \times 100}{43.271.100} = 48,9.$$

C'est ce coefficient qui est représenté par la longueur de l'ordonnée AB à l'échelle du diagramme.

Le diagramme se rapporte à l'exercice 1883, dernier exercice pour lequel on trouve dans le *Bulletin* le montant des recettes et des dépenses, par lignes isolées.

Le détail de chaque groupe de lignes est donné par le tableau annexe A, qui fournit les éléments justificatifs de chacun des points du diagramme. Ce tableau a été formé de la manière suivante :

Toutes les lignes, au nombre de 210, constituant l'ensemble des réseaux des compagnies françaises, ont été inscrites les unes à la suite des autres sans distinction de réseau, dans l'ordre croissant des recettes kilométriques. Ces 210 lignes ont été ensuite subdivisées, dans l'ordre même de leur inscription, en trente-six groupes de longueurs variables, dont la moyenne est d'environ 700 kilomètres. Chaque groupe fournit un point de la

courbe, comme nous l'avons expliqué plus haut pour le point B; et les trente-six points ainsi obtenus se rapprochent beaucoup d'une courbe régulière; cette dernière courbe a été tracée avec la latte flexible ou *règle à poids* (*).

Il y a lieu de remarquer deux points M et N, qui présentent un certain écart, vers les recettes kilométriques de 35 à 45.000 francs. Cette partie de la courbe correspond au passage de la simple à la double voie. A droite, pour les grandes recettes, les lignes sont à double voie; à gauche, pour les recettes plus faibles, la simple voie est en général suffisante.

La transition de la simple à la double voie est mise en évidence par la forme même du diagramme, dont la légère anomalie tient, non au hasard, mais à une cause bien déterminée.

La ligne pleine du diagramme est ainsi la représentation fidèle, à l'abri de toute hypothèse, de la marche générale des coefficients d'exploitation, d'après les documents statistiques publiés par le Ministère des travaux publics pour l'exercice 1883.

Courbe représentative des prix de revient de l'unité de trafic. — Cette même courbe démontre qu'il existe, pour l'exercice qu'elle représente, une relation générale, une loi de continuité, entre le prix de revient de l'unité de trafic (**) et la fréquentation (***); elle est elle-même la

---

(*) Voir, pour l'emploi de cette règle, le beau mémoire de M. Desdouits, notre ancien collaborateur au réseau de l'État, sur les études dynamométriques (*Annales des ponts et chaussées*, mars 1886, p. 402).

(**) L'unité de trafic est représentée par le transport à 1 kilomètre de distance soit de 1 voyageur, soit de 1 tonne de marchandises.

Les accessoires de grande et de petite vitesse sont assimilés aux unités de trafic, en comptant les recettes correspondantes pour autant de fois 1 *voyageur* ou 1 *tonne de marchandises* que cette recette contient de fois le tarif moyen perçu par kilomètre, soit par voyageur, soit par tonne de marchandises.

(***) La fréquentation est le nombre de milliers d'unités de trafic par kilomètre et par an.

représentation graphique de cette relation, comme nous le faisons voir ci-après.

Les recettes totales, impôt déduit, se sont élevées pour les six grandes compagnies, en 1883, à :

1.040.573.000f

et le trafic évalué en milliers d'unités a été de :

18.935.000f ;

il en résulte que la recette par millier d'unités de trafic a été, en moyenne, de :

$$\frac{1.040.576}{18.935} = 54^f,95, \text{ soit } 55^f.$$

Puisque la recette moyenne a été de 55 francs par millier d'unités de trafic, il suffit de diviser la recette kilométrique d'un groupe de lignes par le nombre constant (55) pour obtenir la fréquentation moyenne en milliers d'unités de trafic par kilomètre de ligne (*).

Sur le diagramme (*fig.* 1) des coefficients d'exploitation, 2 millimètres de la ligne des abscisses représentent 1.000 francs de recettes ou, ce qui revient au même,

$$2^{mm} \times 55 \text{ ou } 110^{mm}$$

représentent graphiquement 55.000 francs ou la recette de 1.000 milliers d'unités de trafic.

(*) Il ne faut pas perdre de vue que nous cherchons des résultats *moyens* pour l'ensemble des chemins de fer français, et que nous avons groupé toutes les lignes par recettes kilométriques croissantes sans distinction de réseau.

Voici quelle est approximativement, pour chacun des grands réseaux français, la recette moyenne par millier d'unités de trafic (impôts déduits) :

Nord......	51,70	Ouest......	54,85	Ensemble....	55
Est.......	53,50	P.-O.	58,40		
P.-L.-M. ...	53,90	Midi........	64,70		

On voit que les recettes moyennes par unité de trafic se maintiennent dans des limites assez étroites sur les grands réseaux français : le Midi seul fait exception. — Pour un même réseau, les mêmes tarifs généraux s'appliquent à toutes les lignes, quelles que soient les déclivités.

Sur le même diagramme, la ligne horizontale intitulée : « Unités de trafic-Milliers » porte des divisions de 11 en 11 millimètres, et les points de division correspondent à des fréquentations croissantes de 100 en 100 milliers d'unités de trafic. On obtient, par la lecture directe des ordonnées, les valeurs suivantes comme moyennes, sans distinction de réseaux :

TABLEAU I

FRÉQUENTATION en milliers d'unités de trafic	COEFFICIENTS d'exploitation		FRÉQUENTATION en milliers d'unités de trafic	COEFFICIENTS d'exploitation	
	Exercice 1883	Exercice 1882		Exercice 1883	Exercice 1882
1	2	3	1	2	3
100	130,4	148.0	800	53,6	51,6
200	94,8	98,2	900	52,0	50.0
300	76,2	74,4	1.000	50,2	49,2
400	68.0	65,6	1.500	47,0	46.0
500	62,0	60,0	2.000	45,0	43,0
600	58,0	56,0	2.500	42,0	40,0
700	55,2	53,0	3.000	40,0	39,0

Nous avons inscrit, dans la troisième colonne, les résultats qui se rapportent à l'exercice 1882, en groupant les données statistiques de cet exercice, comme nous l'avons expliqué avec détail pour l'exercice 1883.

Pour l'exercice 1882, les recettes totales (impôt déduit) se sont élevées pour les six grandes compagnies à :

1.037.202.000f,

et le trafic évalué en milliers d'unités a été de :

18.535.000f;

il en résulte que la recette par millier d'unités de trafic a été, en moyenne, pour 1882, de :

$$\frac{1.037.202}{18.535} = 55^f,96, \text{ soit } 56^f.$$

Le coefficient d'exploitation est, comme nous l'avons

dit plus haut, le rapport pour 100 de la dépense totale à la recette, totale ou ce qui revient au même, le rapport pour 100 de la dépense moyenne de 1.000 unités de trafic à la recette moyenne du même nombre d'unités. Ces rapports sont inscrits dans les colonnes 2 et 3 du tableau qui précède pour les exercices 1883 et 1882; si nous multiplions ces rapports par la recette correspondante

54f,95 ou 55f, pour l'exercice 1883,

et

55f,96 ou 56f, pour l'exercice 1882,

et si nous divisons par 100 les produits ainsi formés, nous obtiendrons pour ces deux exercices les prix de revient de 1.000 unités de trafic en fonction de la fréquentation.

Les résultats sont inscrits dans le tableau suivant (colonnes 2 et 3).

TABLEAU II.

FRÉQUENTATION en milliers d'unités de trafic	PRIX DE REVIENT de 1.000 unités de trafic Exercices		DIFFÉRENCE	DIFFÉRENCE p 100	$\frac{P+P'}{2}$
	1883 P	1882 P'	P — P'	$100\frac{P-P'}{P}$	$=P_m$
1	2	3	4	5	6
	fr.	fr.			fr.
100	82,72	82,88	—0,16	— 0,2	82,80
200	52,14	52,19	—0,05	— 0,1	52,16
300	41.91	41,66	+0,25	+ 0,6	41,78
400	37,40	36,74	+0,66	+ 1,7	37,07
500	34,10	33,60	+0,50	+ 1,5	33,85
600	31,90	31,36	+0,54	+ 1,7	31,63
700	30,36	29,68	+0,68	+ 2,2	30.02
800	29,48	28.90	+0,58	+ 1,9	29,19
900	28,60	28,00	+0,60	+ 2,1	28.30
1.000	27.61	27,55	+0,06	+ 0,2	27,58
1.500	25,85	25,76	+0,09	+ 0,3	25,80
2.000	24,75	24,08	+0,67	+ 2,6	24.42
2.500	23.10	22,40	+0,70	+ 3,0	22,75
3.000	22,00	21,84	+0,16	+ 0,8	21,92

Il est bon de remarquer que les prix de revient peuvent être lus directement sur les diagrammes des coeffi-

cients d'exploitation. Ainsi, sur le diagramme (*fig.* 1) qui représente les résultats de l'exercice 1883, 1 millimètre correspond à 2/100 d'unité du rapport de la dépense à la recette; or, cette recette est de 55 francs; 1 millimètre correspond donc à :

$$0,02 \times 55 = 1^{f},10$$

en considérant l'ordonnée comme représentant la dépense réelle ou le prix de revient de 1.000 unités de trafic.

Ainsi, par un simple changement d'échelle, la même courbe donne les coefficients d'exploitation en fonction des recettes kilométriques, et les prix de revient du millier d'unités de trafic en fonction de la fréquentation. Dans le premier cas, les échelles de la courbe (*fig.* 1) sont de

2^{mm} par 1.000^{f} de recette (abscisses)

et de

1^{mm} pour 2 unités (ordonnées).

Dans le deuxième cas, elles sont de

11^{mm} pour 100 milliers d'unités de trafic (abscisses)

et de

1^{mm} pour $1^{f},10$ du prix de revient.

Pour la facilité des lectures et des comparaisons, nous avons tracé à nouveau les courbes des prix de revient aux échelles plus simples et identiques pour les exercices 1882 et 1883 :

de 10^{mm} pour 100 milliers de trafic (abscisses)

et

de 1^{mm} pour 1^{f} (ordonnées) :

et nous avons ainsi formé le diagramme (*fig.* 2) où le trait plein correspond à l'exercice 1883 et le trait pointillé à l'exercice 1882.

Soit qu'on étudie le diagramme (*fig.* 2), soit que l'on

consulte le tableau numérique II (col. 2 et 3), on voit que les prix de revient présentent la même allure, et que l'écart moyen ne dépasse guère 1 p. 100, les prix de revient de 1883 étant en général un peu plus élevés que ceux de 1882.

Ligne de comparaison des prix de revient. — La colonne 6 donne la valeur moyenne P_m des prix de revient des deux exercices, et la courbe moyenne ainsi obtenue fournira, dans la suite de cette notice, un terme de comparaison nettement défini, soit qu'on veuille examiner au point de vue du budget des dépenses l'ensemble d'un autre exercice quelconque, soit qu'on limite la comparaison à une portion du réseau français représentée par l'une des grandes compagnies.

Prix de revient du millier d'unités de trafic en fonction de la fréquentation. — Ces comparaisons, qui offrent le plus grand intérêt, sont singulièrement simplifiées par l'observation suivante :

La courbe moyenne des exercices 1882 et 1883 qui correspond à la colonne 6 du tableau II est représentée, avec une grande approximation, par la formule algébrique :

$$P_\alpha = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

dans laquelle P_α est le prix de revient de 1.000 unités de trafic, et F la fréquentation en milliers d'unités de trafic.

La courbe algébrique $\left(P_\alpha = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50\right)$ est figurée par un tracé en croisillons × × × sur le diagramme (*fig.* 2).

La comparaison numérique des valeurs de P_α, courbe

algébrique et de P_m courbe de la statistique, est résumée dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU III.

FRÉQUENTATION en milliers d'unités de trafic	PRIX DE REVIENT de 1.000 unités de trafic		DIFFÉRENCE	DIFFÉRENCE p. 100
	1883 et 1882 P_m	Courbe théorique $P_\alpha = \frac{6\,125^f}{F} + 21^f{,}50$	$P_m - P_\alpha$	$100 \frac{P_m - P_\alpha}{P_m}$
1	2	3	4	5
	fr.	fr.		
100	82,80	82,75	+0,05	+0,06
200	52,16	52,12	+0,04	+0,08
300	41,78	41,91	−0,13	−0,30
400	37,07	36,81	+0,26	+0,70
500	33,85	33,75	+0,10	+0,30
600	31,63	31,71	−0,08	−0,25
700	30,02	30,25	−0,23	−0,76
800	29,19	29,16	+0,03	+0,10
900	28,30	28,30	0	0
1.000	27,58	27,62	−0,04	−0,15
1.500	25,80	25,58	+0,22	+0,85
2.000	24,42	24,56	−0,14	−0,57
2.500	22,75	23,95	−1,20	−5,28
3.000	21,92	23,54	−1,62	−7,39

Le diagramme (*fig.* 2) et le tableau numérique III mettent en évidence la coïncidence pour ainsi dire absolue des valeurs de P_m et de P_α, pour toutes les lignes dont la fréquentation ne dépasse pas 2.250 milliers d'unités de trafic, c'est-à-dire pour toutes les lignes dont la recette ne dépasse pas 125.000 francs par kilomètre.

Pour les recettes supérieures à 125.000 francs, la courbe théorique donne des valeurs un peu trop fortes, mais on sait que les recettes supérieures à 125.000 francs sont localisées sur une très minime fraction du réseau français. Nous arrivons ainsi à condenser, dans une formule très simple, les résultats généraux qui se dégagent des documents statistiques publiés par le Ministère des Travaux publics pour les exercices 1882 et 1883, savoir :

$$P_\alpha = \frac{6.125^f}{F} + 21^f{,}50.$$

P_α étant le prix de revient du millier d'unités de trafic,
F étant la fréquentation en milliers d'unités de trafic par kilomètre et par an.

Dans les traités de concession de lignes ferrées, on cherche fréquemment à établir à forfait les dépenses d'exploitation par kilomètre, et, dans ce but, on fait usage de formules donnant ces dépenses en fonction des recettes brutes kilométriques (impôts déduits).

Désignons pour une ligne quelconque

par E les dépenses d'exploitation par kilomètre,
par R les recettes brutes (impôts déduits),

la relation entre E et R est donnée par une expression du premier degré de la forme

$$E = C + \alpha R, \tag{1}$$

dans laquelle C et α sont deux constantes qui dépendent des conditions spéciales de la ligne considérée, tramway, ligne à voie étroite, ligne à voie large, etc.

La formule générale

$$P_\alpha = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

ou, ce qui revient au même,

$$P_\alpha F = 6.125 + 21,50F \tag{2}$$

permet de déterminer les valeurs des constantes C et α pour l'ensemble des lignes des grands réseaux français.

En effet, $P_\alpha F$ n'est autre chose que le prix de revient de l'exploitation par kilomètre, puisque P_α est le prix de revient du millier d'unités de trafic et que F est la fréquentation ; on a donc :

$$P_\alpha F = E.$$

D'autre part, pour l'ensemble des grands réseaux, la

recette kilométrique est de 55 francs par millier d'unités de trafic, la recette kilométrique R aura donc pour valeur $55 \times F$, et, par suite, on aura :

$$F = \frac{1}{55} R.$$

Remplaçant dans l'expression (2)

$$P_{\alpha} F \quad \text{par } E \quad \text{et} \quad F \text{ par } \frac{1}{55} R,$$

on aura :

$$E = 6.125 + \frac{21,50}{55} R. \qquad (3)$$

En rapprochant les expressions (1) et (3), on constate que, pour l'ensemble des lignes des grands réseaux, C et α ont les valeurs suivantes :

$$C = 6.125^{f},$$
$$\alpha = \frac{21,50}{55} = 0,39.$$

Ces valeurs conviennent aussi bien aux lignes à faible trafic qu'aux lignes à moyen ou à grand trafic ; toutes ces lignes sont exploitées suivant des méthodes uniformes.

CHAPITRE II.

MODE DE RÉPARTITION DU TRAFIC D'APRÈS LES DOCUMENTS STATISTIQUES.

Conséquences déduites de la formule du prix de revient. — Nous avons démontré, dans le premier chapitre, que les coefficients d'exploitation, par groupes de lignes à recettes croissantes, sont représentés par une courbe régulière : qu'il en est de même pour les prix de revient du millier d'unités de trafic, et nous avons cons-

tató qu'une formule algébrique, où n'entrent que deux constantes numériques, donne pour l'ensemble des exercices 1882 et 1883 la valeur moyenne du prix de revient du millier d'unités de trafic, en fonction de la fréquentation, avec une approximation très grande.

Ces résultats méritent de fixer l'attention, car ils mettent en évidence un état d'équilibre très remarquable dans la répartition de l'ensemble du trafic en France. Les observations suivantes feront saisir, d'une manière plus complète, comment cet état d'équilibre est manifesté par la formule

$$P_\alpha = \frac{6.125}{F} + 21,50.$$

Invariabilité des prix de revient pour une même fréquentation générale. — Une première constatation qui se déduit de cette formule est la suivante :

De quelque façon que le trafic se partage entre les divers groupes de lignes d'un réseau, pourvu que la fréquentation moyenne générale soit la même, le prix de revient du millier d'unités de trafic reste invariable.

Considérons, en effet, divers groupes de lignes : K_1, K_2... K_n à recettes kilométriques croissantes et ayant pour fréquentations respectives F_1, F_2... F_n ; la longueur totale L du réseau est égale à la somme des groupes de lignes :

$$L = K_1 + K_2 + ... + K_n = \Sigma K.$$

La fréquentation moyenne F_R du réseau, en milliers d'unités de trafic, a pour valeur

$$F_R = \frac{K_1F_1 + K_2F_2 + ... + K_nF_n}{L} = \frac{\Sigma KF}{L}.$$

Enfin le prix de revient de 1.000 unités de trafic est pour chaque groupe

$$P_1 = \frac{6.125}{F_1} + 21{,}50,$$
$$P_2 = \frac{6.125}{F_2} + 21{,}50,$$
$$\dots\dots\dots\dots$$
$$P_n = \frac{6.125}{F_n} + 21{,}50.$$

En multipliant les deux membres successivement par K_1F_1, K_2F_2... K_nF_n, nous aurons les égalités

$$K_1F_1P_1 = 6.125\,K_1 + 21{,}50\,K_1F_1,$$
$$K_2F_2P_2 = 6.125\,K_2 + 21{,}50\,K_2F_2,$$
$$K_nF_nP_n = 6.125\,K_n + 21{,}50\,K_nF_n.$$

En additionnant tous ces égalités nous aurons :

$$K_1F_1P_1 + K_2F_2P_2 + \dots + K_nF_nP_n = 6.125\,(K_1 + K_2 + \dots + K_n) + 21{,}50\,(K_1F_1 + K_2F_2 + \dots + K_nF_n)$$

ou en divisant les deux membres par la somme totale $(K_1F_1 + K_2F_2 + \dots K_nF_n)$ des unités de trafic,

$$\frac{K_1F_1P_1 + K_2F_2P_2 + \dots + K_nF_nP_n}{K_1F_1 + K_2F_2 + \dots + K_nF_n} = 6.125\left(\frac{K_1 + K_2 + \dots + K_n}{K_1F_1 + K_2F_2 + \dots + K_nF_n}\right) + 21{,}50.$$

Or, le premier membre n'est autre chose que la dépense totale du réseau, divisée par le nombre total de milliers d'unités de trafic ; c'est donc le prix de revient du millier d'unités de trafic de l'ensemble du réseau ou P_R.

D'autre part, le rapport

$$\frac{K_1F_1 + K_2F_2 + \dots + K_nF_n}{K_1 + K_2 + \dots + K_n} = \Sigma\,\frac{KF}{L}$$

est l'expression de la fréquentation moyenne du réseau ou F_R ; nous pourrons donc poser pour l'ensemble du réseau :

$$P_R = \frac{6\,125^f}{F_R} + 21^f{,}50.$$

On voit que P_R reste invariable pour une même valeur de F_R, de quelque manière que la somme $\Sigma KF = K_1F_1 + K_2F_2 + \ldots K_nF_n$ soit constituée.

Il est donc indifférent que le réseau se compose de lignes à trafic très inégal ou simplement de lignes à trafic moyen uniforme : le prix de revient du millier d'unités de trafic de l'ensemble des lignes considérées ne dépend que de la fréquentation moyenne générale F_R.

Cette loi très simple ne se vérifie pas pour tous les pays, ni pour tous les exercices, mais elle est l'expression d'un état d'équilibre stable vers lequel convergent inévitablement toutes les attractions exercées sur le trafic, dans les diverses directions.

Équilibre des prix de revient entre diverses directions. — Nous venons d'établir, d'après les documents publiés par le Ministère des Travaux publics, que pour un groupe quelconque de lignes la dépense actuelle est par 1.000 unités de trafic :

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50;$$

c'est-à-dire que le transport de F milliers d'unités de trafic à 1 kilomètre coûte :

$$6.125^f + 21^f,50\,F.$$

Si F augmente et devient $F' = F + \alpha$, la nouvelle dépense sera

$$6.125^f + 21^f,50(F + \alpha),$$

l'accroissement des dépenses sera donc

$$\alpha \times 21^f,50.$$

L'accroissement de dépenses est indépendant de F ; si F est faible, le transport additionnel α se fera en général sur des lignes accidentées ; si F est élevé, le transport additionnel α se fera sur des lignes à profil facile. On ar-

rive à cette conséquence qui peut paraître singulière et inattendue, c'est que *la dépense additionnelle à faire pour le transport d'un même tonnage à une même distance est indépendante des difficultés du profil.* En d'autres termes, si deux gares extrêmes sont reliées par deux lignes offrant la même longueur λ, l'une à profil facile, l'autre à profil accidenté, il est indifférent *dans l'état actuel de la répartition du trafic* de faire suivre l'une ou l'autre direction, pourvu que la fréquentation de chaque ligne ne subisse que de légères variations. En prélevant sur la ligne à profil facile un tonnage T, la diminution de dépenses δ résultant de ce prélèvement sera :

$$\delta = 21{,}50\,\lambda\,\frac{T}{1.000}.$$

En faisant suivre à ce tonnage T la voie accidentée, la dépense additionnelle sera :

$$\delta^1 = 21{,}50\,\lambda\,\frac{T}{1.000},$$

c'est-à-dire exactement égale à la diminution δ.

On voit bien sous cette forme que chaque Compagnie, considérée isolément, doit avoir pour objectif de répartir les transports de manière à réaliser cette égalité de dépense

$$\delta = \delta^1$$

dans chaque direction. Si, en effet, il y avait une différence entre δ et δ^1, on pourrait réaliser une économie par un simple changement de direction et aussitôt la compagnie intéressée reporterait une partie du tonnage sur la ligne où le transport additionnel se ferait avec une moindre dépense.

Il résulte de ce qui précède, que pour les exercices 1882 et 1883, le trafic s'est distribué en France, malgré l'indépendance des Compagnies, à peu près de la même manière

qu'une seule et même compagnie aurait cherché à le distribuer, en se donnant pour règle d'effectuer les transports avec le minimum de dépense.

Etablissement d'une répartition stable du trafic. — Ce n'est pas du premier coup que les transports d'un grand pays atteignent cette distribution normale. Les lignes à grand trafic sont construites les premières ; peu à peu des lignes secondaires s'établissent comme affluents des lignes principales. Chacune d'elles apporte son trafic local et, comme nous l'avons vu, aussi bien par les diagrammes que par la formule

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

le prix de revient de l'unité de trafic sur les lignes secondaires est d'autant plus élevé que la fréquentation est moindre.

Bientôt les lignes secondaires se relient entre elles et complètent successivement les mailles du réseau général.

Sur les grandes lignes, les trains circulent à pleine charge, les voitures à voyageurs ont beaucoup de places occupées, les wagons à marchandises atteignent la limite du chargement : sur les lignes secondaires, les machines sont moins bien utilisées, les voitures sont presque vides et les wagons peu chargés. Sur une grande ligne, un transport additionnel exigera des véhicules additionnels, des trains additionnels ; sur une ligne à faible fréquentation, rien de pareil : ni véhicules ni trains additionnels ; trains, voitures et wagons seront mieux utilisés.

Voilà comment la dépense additionnelle peut être la même dans les deux directions, malgré la diversité des profils, et voilà comment elle tend nécessairement à devenir la même en vertu de cette loi économique que *tout tonnage pour passer d'un point à un autre suit la direction de moindre dépense.*

Une étude fort intéressante de M. Nordling, publiée dans nos *Annales* (mois de février 1886), sur la répartition du trafic en Autriche, nous montre ce trafic dans une période de transition. Il résulte des tracés graphiques de M. Nordling que pour l'Autriche les prix de revient par 1.000 unités de trafic sont plus élevés lorsque la fréquentation est uniforme sur toutes les lignes d'un réseau que lorsqu'elle est répartie inégalement, la moyenne générale restant la même. C'est là, croyons-nous, une anomalie que la répartition naturelle du trafic fera disparaître dans un delai plus ou moins long.

Prix des transports en service.

La formule $P = \frac{6.125^{f}}{F} + 21^{f},50$ donne la solution d'une question qu'on a souvent à examiner en établissant le budget des dépenses de l'ensemble de l'exploitation d'un chemin de fer. Quel tarif une compagnie doit-elle appliquer aux transports qu'elle fait pour son propre compte? La réponse est simple : le tarif appliqué doit représenter la dépense additionnelle, sans gain ni perte, résultant de ce transport. Nous avons vu plus haut que cette dépense est

$$\frac{T}{1.000} \times 21,50$$

pour un tonnage T transporté à 1 kilomètre, le tonnage T correspondant *comme nature* à la moyenne des marchandises transportées.

C'est donc un tarif de $0^{f},0215$ ou en nombre rond

de $0^{f},02$

par tonne et kilomètre, qui est applicable aux matières assimilables à la moyenne du trafic, comme le sont en général les fournitures pour l'approvisionnement des magasins. Mais lorsqu'on considère spécialement les com-

bustibles, ce tarif de $0^f,02$ est trop élevé et représente plus que la dépense additionnelle.

En effet, les combustibles sont toujours transportés à pleine charge (soit 10 tonnes par wagon), de sorte qu'en admettant le retour à vide des wagons, ce qui est le cas le plus défavorable, on obtient une charge moyenne de

5 tonnes;

en outre, les transports se font en général à grande distance; le combustible est livré sur wagons sans délai fixe, sans frais de chargement; il est déchargé dans les dépôts par le service destinataire; les wagons n'occupent que les places disponibles dans les trains; pour ces divers motifs, on trouve que le prix du transport du combustible sur le réseau consommateur doit être établi par application d'un tarif moindre, soit environ

$0^f,015$

par tonne et kilomètre.

Trafic et prix de revient comparés des exercices 1883 *et* 1884. — Après l'étude générale que nous venons d'exposer, il n'est pas sans intérêt de faire quelques applications des règles auxquelles nous avons été conduit.

La comparaison des résultats généraux des exercices 1883 et 1884 des réseaux français est particulièrement instructive. Nous mettons en regard, ci-dessous, les données statistiques pour l'ensemble des six grandes compagnies:

DÉSIGNATION		EXERCICES	
		1883	1884
Longueur kilométrique exploitée		21.163^k	26.163^k
Recette totale (impôt déduit)		1.040.573.000	1.081.936.000
Recette kilométrique		49.170	39.275
Unités de trafic (milliers)		18.935.000	18.706 000
Recette par millier d'unités de trafic		54,95	55,18
Fréquentation en millier d'unités de trafic		894	712
Dépenses par 1.000 unités de trafic	Traction	9,96	10,58
	Autres services	18,43	18,99
	Ensemble	28,39	29,55

On voit que pour l'exercice 1884, la dépense par 1.000 unités de trafic a été de

$$29^f,55,$$

tandis que cette dépense ne s'est élevée qu'à

$$28^f,39$$

pour l'exercice 1883. La dépense a donc augmenté de $29,55 - 28,39 = 1^f,16$, augmentation qui correspond à

$$\frac{1,16}{28,39} \quad \text{ou} \quad 4,1 \text{ p. } 100.$$

Cependant, en 1884, les recettes kilométriques ont baissé dans une forte proportion, et il est certain que les six grandes Compagnies ont cherché à réduire les dépenses sur toutes leurs lignes : comment ces efforts se traduisent-ils par une augmentation du prix de revient de l'unité de trafic dépassant 4 p. 100?

La formule $P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50$ donne l'explication de cette anomalie apparente; elle fournit le véritable terme de comparaison dans lequel la fréquentation moyenne joue un rôle prépondérant.

En 1883, la fréquentation moyenne pour les six grands réseaux était de

894 milliers d'unités de trafic;

en remplaçant F par cette valeur (894), nous trouvons pour le prix de revient normal P de 1.000 unités de trafic en 1883

$$P = \frac{6.125^f}{894} + 21^f,50 = 28^f,35,$$

c'est-à-dire à peu près exactement le prix de revient réel, lequel a été de

$$28^f,39.$$

Ce dernier prix offre un léger excédent de $0^f,04$ ou 0,14 p. 100.

En 1884, la fréquentation moyenne s'abaisse à

712 milliers d'unités;

et en remplaçant F par cette nouvelle valeur, nous trouvons pour le prix de revient normal de l'exercice 1884,

$$P = \frac{6^f.125^f}{712} + 21^f,50 = 30^f,10.$$

C'est bien à

$30^f,10$

que s'est élevé en 1882-1883 le prix de revient de 1.000 unités de trafic sur un groupe quelconque de lignes ayant pour fréquentation moyenne 712 milliers d'unités de trafic.

Or, nous venons de voir que ce même prix de revient correspondant à F = 712 s'est abaissé en 1884 à

$29^f,55$.

La différence $30^f,10 - 29^f,55$ est de $0^f,55$, et cette différence correspond à une économie en faveur de l'exercice 1884, de

$$\frac{55}{30,10} = 1,82 \text{ p. } 100.$$

On peut donc estimer l'économie réelle dans les dépenses à

$$1,82 + 0,14 = 1,96 \text{ ou } 2 \text{ p. } 100$$

en faveur de l'exercice 1884 par rapport à l'exercice 1883; ce coefficient proportionnel de 2 p. 100 correspond pour l'ensemble des six réseaux à une économie de plus de dix millions de francs. Ainsi la formule

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50$$

démontre que les efforts des compagnies n'ont pas été stériles; elle fait ressortir *une économie de* 2 *p.* 100 au lieu *d'une augmentation de* 4,1 *p.* 100.

Trafic et prix de revient comparés de deux réseaux. — Si nous comparons pour les deux mêmes exercices deux réseaux distincts, l'Ouest et le P.-L.-M. par exemple, nous obtenons les résultats suivants :

DÉSIGNATION	OUEST		P.-L.-M.	
	1883	1884	1883	1884
Longueur kilométr. exploitée.	2.802	4 031	6 084	7.293
Recettes totales (impôt déduit).	133.143.153f	137.860.000f	332.844.130f	321.619.000f
Recettes kilométriques.	46.769f	34.199f	54.700f	54.100f
Unités de trafic (milliers) . . .	2.468.000	2.513.000	6.108.000	5.964.000
Recettes par millier d'unités de trafic	53f,94	54f,85	54f,50	53f,93
Fréquentation en milliers d'unités.	867	623	1.004	818
Dépenses par 1.000 unités de trafic — Traction.	10f,31	11f,83	9f,80	9f,23
— Autres services.	18 ,29	19 ,64	17 ,00	17 ,01
— Ensemble. . . .	28 ,60	31 ,47	26 ,80	26 ,24
Valeur de P d'après la formule $\frac{6125}{F} + 21,50 = P$.	28 ,57	31 ,33	27 ,60	28 ,99
Excédent p. 100 de dépenses par rapport à P	0 ,10	0 ,44	»	»
Économie p. 100 par rapport à P.	»	»	2 ,9	9 ,5

Il ressort du tableau qui précède que pour le réseau de l'Ouest, les dépenses des exercices 1883 et 1884 correspondent à peu près exactement aux dépenses normales données par la formule

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50.$$

La dépense normale pour 1883 est, en effet, de. 28f,57
par 1,000 unités de trafic, et la dépense réelle
est de. . . . . 28 ,60
la dépense normale pour 1884 est de . . . . . . 31 ,33
et la dépense réelle de. . . . . 31 ,47
tandis que si on considérait simplement les prix de revient des deux exercices, savoir :

28f,60 pour 1883

et

31f,47 pour 1884,

on constaterait une augmentation apparente de

$$2^f,87 \quad \text{ou} \quad \frac{2.87}{28.60} = 10 \text{ p. } 100.$$

En étudiant les données relatives au réseau P.-L.-M., nous constatons par rapport aux prix normaux donnés par la formule

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

une économie de

2,9 p. 100, en 1883

et de

9,5 p. 100, en 1884.

En effet, pour l'exercice 1883, la formule donne

$$P = 27^f,60,$$

la dépense réelle étant de	$26^f,80$
il y a une économie de.	0 ,80

$$\text{ou} \quad \frac{80}{27,55} = 2,9 \text{ p. } 100.$$

Pour l'exercice 1884, la formule donne

$$P = 28^f,99,$$

la dépense réelle étant de	$26^f,24$
il y a une économie de.	2 ,75

$$\text{ou} \quad \frac{2,75}{28,99} = 9,5 \text{ p. } 100.$$

Pour ce même réseau P.-L.-M., on peut dire que les dépenses pour l'exercice 1883 sont inférieures de 2,9 p. 100 à la moyenne des dépenses de l'ensemble des réseaux français. On peut ajouter, en outre, que l'exercice 1884 présente, par rapport à l'exercice 1883, une économie réelle de

9,5 — 2,9 ou 6,6 soit 7 p. 100,

alors que les prix de revient du millier d'unités de trafic

comparés directement entre eux,

$$26^f,80 \text{ pour } 1883$$

et

$$26^f,24 \text{ pour } 1884,$$

ne mettent en évidence qu'une réduction de

$$26^f,80 - 26^f,24 = 0^f,56,$$

ou

$$\frac{56}{26,80} \quad \text{ou} \quad 2,1 \text{ p. } 100.$$

CHAPITRE III.

ABAISSEMENT DES PRIX DE REVIENT DES TRANSPORTS PAR VOIES FERRÉES.

Exposé. — Nous avons montré, dans les chapitres qui précèdent, de quelle manière les prix de revient des transports, considérés dans leur ensemble, varient avec la fréquentation, et, par divers exemples, nous avons fait ressortir avec quelle facilité on se rend compte des conditions plus ou moins favorables dans lesquelles s'exploite un réseau déterminé.

Il faudrait pouvoir remonter des effets aux causes, et déduire de l'examen des éléments divers, qui constituent les prix de revient des six grands réseaux, la part des influences locales, telles que le bas prix du combustible ou de la main-d'œuvre, et la part des progrès introduits dans le fonctionnement industriel, dans l'utilisation du travail produit.

En voyant, par exemple, la compagnie P.-L.-M. réaliser une économie de près de 10 p. 100 sur la moyenne générale des frais d'exploitation des Compagnies françaises, on est naturellement conduit à se demander si, grâce aux progrès dont est susceptible l'industrie des chemins de fer comme toute autre industrie, il n'est pas possible d'a-

baisser davantage encore les prix de revient des transports. Cet abaissement du niveau des prix ouvrirait la voie à la réduction des tarifs, et comme conséquence, attirerait vers les réseaux français une partie des produits qui transitent par les réseaux étrangers.

Cette affluence d'un trafic nouveau en augmentant la fréquentation se traduirait elle-même par une nouvelle amélioration de l'ensemble des prix de revient, amélioration dont la mesure est donnée par une expression de la forme

$$P = \frac{A}{F} + B,$$

dans laquelle le prix de revient P diminue à mesure que la fréquentation F augmente; au moment où sur tous les réseaux français les recettes kilométriques subissent une baisse profonde qui s'explique en partie par l'ouverture incessante de lignes nouvelles, la question est, on le voit, de la plus haute importance.

Prix de revient du réseau de l'État. — Nous chercherons, dans ce qui va suivre, à donner en quelque sorte un corps aux réflexions qui précèdent en examinant les faits constatés sur le réseau de l'État pendant les exercices 1884 et 1885. Voici d'abord le résumé exact des unités de trafic et des dépenses d'exploitation pour l'ensemble du réseau de l'État pendant ces deux exercices.

EXERCICES	UNITÉS DE TRAFIC	DÉPENSES D'EXPLOITATION
1884	514.265.289	20.042.620
1885	553.289.969	21.497.561

On déduit du tableau qui précède pour prix de revient

du millier d'unités de trafic,

en 1884, $38^f,95$,
en 1885, $38^f,85$.

Les longueurs moyennes exploitées ont été les suivantes :

en 1884, 2.037^{kil},
en 1885, 2.215.

La fréquentation moyenne en milliers d'unités de trafic par kilomètre a été

$$\text{en } 1884, \quad \frac{514.265.289}{2.037} = 252,$$

$$\text{en } 1885, \quad \frac{553.289.969}{2.215} = 250.$$

En se reportant, soit à notre ligne de comparaison des prix de revient (*fig.* 2), soit à la formule générale des grands réseaux français

$$P = \frac{6.125^f}{F} + 21^f,50,$$

on trouve comme dépense normale, pour

$$F = 252 \text{ (exercice 1884)},$$

le prix de revient

$$P = 45^f,80,$$

et pour

$$F = 250 \text{ (exercice 1885)},$$

le prix de revient

$$P = 46^f,00.$$

Économie constatée de 15 *et* 15,5 *p.* 100 *par rapport à la courbe de comparaison.* — L'économie en faveur du réseau de l'État est de

$$45^f,80 - 38^f,95 = 6^f,85 \text{ ou } \frac{6,85}{45,80} = 15,0 \text{ p. } 100 \text{ en } 1884,$$

et de

$$46^f,00 - 38^f,85 = 7^f,15 \text{ ou } \frac{7,15}{46,00} = 15,5 \text{ p. } 100, \text{ en } 1885 \text{ (*)}.$$

Les constatations qui précèdent, déduites directement des documents statistiques publiés par le Ministère des travaux publics, d'une part, et des comptes rendus de l'administration des Chemins de fer de l'État, d'autre part, établissent très clairement que les prix de revient du millier d'unités de trafic sur le réseau de l'État, mis en regard de la courbe générale des Compagnies (*fig.* 2), ou ce qui revient au même, mis en regard des prix de revient moyens constatés (1882 et 1883) sur les lignes de même fréquentation de l'ensemble des grands réseaux français, présentent, par rapport à ceux-ci, une économie de

15 p. 100, en 1884,

et de

15,5 p. 100, en 1885.

La réalité de l'abaissement du prix de revient est démontrée, mais à quelles causes précises cet abaissement doit il être attribué?

Manque d'uniformité dans la comptabilité statistique des Chemins de fer. — C'est un problème dont la solution serait facile, si la comptabilité de toute les Compagnies était tenue suivant un mode uniforme et suivant une nomenclature unique. Malheureusement cette uniformité

(*) Il est intéressant de relire les diverses discussions qui ont eu lieu en 1884 et 1885 devant les Chambres sur l'administration des chemins de fer de l'État. On reprochait à cette administration de dépenser 80 p. 100 des recettes en frais d'exploitation, tandis que les grandes compagnies françaises ne dépensaient que 50 p. 100. — On perdait totalement de vue l'influence du principal facteur, *la fréquentation*; aujourd'hui que les compagnies incorporent dans leurs réseaux de nombreuses lignes à faible trafic qu'elles exploitent à 100 p. 100 et plus encore, on pourra leur opposer ce même réseau de l'État qui maintenant dépense moins de 80 p. 100.

de nomenclature n'existe pas. Toutefois, sans parler des dépenses générales d'administration et de direction, on trouve dans les comptes rendus de toutes les Compagnies trois grandes divisions :

Exploitation;
Traction;
Voie.

Cette triple division est à peu près identique sur tous les réseaux : elle fournit aux recherches un premier point de départ; mais dès qu'on entre dans les détails, les classifications des dépenses diffèrent entre elles et c'est ce qui rend les comparaisons très incertaines.

Part proportionnelle des dépenses de la traction : réseau État. — Nous tenterons pour l'une de ces trois branches, *la traction*, qui comprend à peu près le tiers des dépenses totales, de faire ressortir quelle part lui doit être attribuée dans cette économie de 15 et 15,5 p. 100 signalée plus haut. Un mode d'investigation analogue pourrait ensuite être appliqué aux autres branches de l'exploitation générale considérées successivement et isolément.

Voici d'abord pour le réseau de l'État le rapport entre les dépenses de la traction et celles de tous les autres services, pris en bloc, pour les exercices 1882 et 1883.

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES		OBSERVATIONS
	Exercice 1882	Exercice 1883	
Traction	6.710.140,83	7.575.173,49	Ces chiffres sont extraits des comptes rendus de l'administration, adressés au ministre des travaux publics.
Autres services	14.502.049,92	16.518.417,88	
Ensemble	21.212.190,74	24.093.591,37	
Dépenses de la traction pour 100 francs dépensés par les autres services.	46 fr.	46 fr.	

Voici pour le même réseau de l'État les mêmes renseignements pour les exercices 1884 et 1885.

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES Exercice 1884	DÉPENSES TOTALES Exercice 1885	OBSERVATIONS
Traction	5.635.174,30	6.031.858,50	Les mêmes documents que ceux indiqués ci-dessus.
Autres services	14.407 415,62	15.465.702,90	
Ensemble	20.012.619,92	21.497.561,40	
Dépenses de la traction pour 100 francs dépensés par les autres services.	39 fr.	39 fr.	

Part proportionnelle des dépenses de la traction. Grands réseaux. — Cherchons comment se répartissent les dépenses sur les grands réseaux français. Voici d'abord la répartition pour les exercices 1882 et 1883.

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES Exercice 1882	DÉPENSES TOTALES Exercice 1883	OBSERVATIONS
Traction	175.130.114	186.387.550	Ces chiffres sont extraits des comptes rendus des compagnies et de la *Revue générale des chemins de fer.*
Autres services	338.552.207	351.134.892	
Ensemble	513.682.321	537.522.442	
Dépenses de la traction pour 100 francs dépensés par les autres services.	51 fr.	53 fr.	
Moyenne	52 fr.		

Voici la répartition pour les exercices 1884 et 1885.

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES Exercice 1884	DÉPENSES TOTALES Exercice 1885	OBSERVATIONS
Traction	193.447.647	180.007.620	Mêmes documents que ci-dessus.
Autres services	359.514.171	360.101.469	
Ensemble	552.961.818	540.109.089	
Dépenses de la traction pour 100 francs dépensés par les autres services.	51 fr.	50 fr.	
Moyenne	52 fr.		

Sur les grands réseaux français les dépenses de la Traction pour 100 francs dépensés par les autres services, s'élèvent en moyenne à

52f,00

pour les exercices 1882 et 1883. La moyenne est la même, soit 52 francs pour les exercices suivants, 1884 et 1885.

Sur le réseau de l'État, ces dépenses se maintiennent à un niveau constant

46f,00

pour les deux exercices 1882 et 1883, et elles subissent une diminution *extraordinaire* en 1884 et 1885, puisqu'elles descendent à

39f,00.

C'est un abaissement brusque de

$$\frac{46 - 39}{46} = 15,2 \text{ p. } 100.$$

Prix de revient de la traction. Réseau d'État. — Ces premiers rapprochements démontrent bien l'abaissement relatif des dépenses de traction sur le réseau de l'État, mais ils ne font pas connaître la valeur absolue des dépenses rapportées à l'unité de trafic. Nous chercherons à compléter la comparaison en décomposant les prix de revient réels. Pour le réseau de l'État, la décomposition est facile : elle est inscrite dans les comptes rendus.

Le tableau suivant donne tous les éléments :

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES		TOTAUX et moyennes
	Exercice 1884	Exercice 1885	
Unités de trafic	514.265.289	553.289.969	1.067.555.258
Traction	5.635.174^f,30	6.031.858^f,50	11.667.032^f,80
Autres services	14.407.445^f,62	15.465.702^f,90	29.873.148^f,52
Ensemble	20.042.619^f,92	21.497.561^f,40	41.540.181^f,32
DÉPENSES PAR 1.000 UNITÉS DE TRAFIC			
Traction	10^f,95	10^f,90	10^f,92
Autres services	28^f,00	27^f,95	27^f,97
Ensemble	38^f,95	38^f,85	38^f,89
Fréquentation	252	250	251

Prix de revient de la traction. Grands réseaux. — Pour les grands réseaux, nous savons, d'une part, que pour une fréquentation de 251 milliers d'unités de trafic le prix de revient du millier d'unités de trafic est de :

45^f,90.

Nous savons, d'autre part, que sur ces mêmes réseaux les dépenses de la traction s'élèvent à 52 francs pour 100 francs dépensés par les autres services ; d'après ces bases, le prix de revient 45^f,90 se décompose de la manière suivante :

Dépenses par 1.000 unités de trafic	Traction	15^f,70
	Autres services	30^f,20
	Ensemble	45^f,90
Fréquentation		252

Comparaison de ces prix de revient. — Le tableau ci-après permet d'embrasser d'un coup d'œil les prix de revient décomposés, et l'économie pour 100 en faveur du réseau de l'État.

DÉSIGNATION	DÉPENSES TOTALES PAR 1.000 UNITÉS DE TRAFIC		
	Réseau de l'État	Six grands réseaux français	Économie p. 100 en faveur du réseau de l'État
Traction	$10^f,92$	$15^f,70$	30 p. 100
Autres services	$27^f,97$	$30^f,20$	7 p. 100
Ensemble	$38^f,89$	$45^f,90$	15 p. 100
Fréquentation	251	251	»

C'est sur la traction que portent spécialement nos investigations. Il est manifeste, d'après le tableau qui précède, que sur le réseau de l'État la traction produit, pour ce qui la concerne, l'unité de trafic avec une économie de 30 p. 100 par rapport aux dépenses de même nature des grands réseaux français; mais la question est loin d'être épuisée.

Analyse des prix de revient de la traction. Réseau de l'État. — Cette économie de 30 p. 100 peut prendre sa source en partie dans une meilleure utilisation de la place offerte dans les trains; en partie dans une production plus économique du travail moteur; en partie dans un rendement plus élevé de ce travail. Comment mesurer l'influence de chacun de ces trois facteurs?

Influence d'une meilleure utilisation des places offertes. — Si nous considérons, par exemple, divers trains de voyageurs composés de la même manière, l'un transportant 7,5 voyageurs par véhicule ou l'équivalent en bagages et messageries, et l'autre 6,5 voyageurs seulement; la dépense de la traction sera pratiquement la même; soit δ cette dépense par kilomètre et n le nombre de véhicules, le prix de revient pour l'unité du trafic sera pour l'un des trains

$$\frac{\delta}{6{,}5n}$$

et pour l'autre,

$$\frac{\delta}{7,5\,n};$$

l'économie proportionnelle en faveur du train dont les places sont mieux utilisées sera par unité de trafic :

$$\frac{\frac{\delta}{6.5\,n}-\frac{\delta}{7,5\,n}}{\frac{\delta}{6,5\,n}}=1-\frac{6,5}{7,5}=\frac{1}{7,5} \quad \text{ou} \quad 13,33 \text{ p. } 100.$$

Nous savons que sur le réseau de l'État le nombre moyen de places occupées est de 7,5 par véhicule, mais la statistique est muette sur le nombre de places occupées dans les véhicules des grands réseaux circulant sur les lignes de même fréquentation (251); la voie paraît donc fermée à nos recherches dans cette direction et nous ne pouvons pas déterminer par là quelle est la part d'économie qui doit être attribuée à la meilleure utilisation des places offertes, mais la difficulté peut être tournée, et voici de quelle manière :

Prix de revient de la traction rapportés à la charge brute. — La charge brute remorquée par les trains de voyageurs est exactement connue pour plusieurs grands réseaux et approximativement pour les autres; il en est de même des prix de revient des kilomètres de trains. On obtient pour l'ensemble des réseaux les chiffres suivants pour les trains de voyageurs (exercice 1883) :

Prix moyen de 1.000 kilomètres de train. . . .	$707^{f},40$
Charge moyenne en tonnes brutes.	208 tonnes.
Prix moyen de 1.000 tonnes kilométriques brutes.	$6^{f},55$

Voici les chiffres exacts pour le réseau de l'État, trains de voyageurs :

	EXERCICE 1884	EXERCICE 1885	ENSEMBLE
Prix moyen de 1.000 kilomètres de train.	574f,00	593f,53	583f,80
Charge moyenne en tonnes brutes . . .	105,00	111,00	108,00
Prix moyen de 1.000 tonnes kilométriques brutes	5f,44	5f,35	5f,39

Envisagées sous ce nouvel aspect, les dépenses de la traction rapportées au transport de 1.000 tonnes brutes à 1 kilomètre présentent en faveur du réseau de l'État une économie proportionnelle de

$$\frac{6,55 - 5,39}{6,55} = 17,7 \text{ p. } 100.$$

Dans ce mode de comparaison la fréquentation n'intervient plus; nous mettons en parallèle la dépense moyenne pour l'ensemble du réseau sans tenir compte des *rampes caractéristiques* (*); or, il est bien certain que la rampe caractéristique de l'ensemble des réseaux français qui est de 8 millimètres est plus favorable que la rampe caractéristique du réseau de l'État, lequel ne comprend que des lignes à rampes effectives de 8, 10, 12 et 15 millimètres. L'économie de 17,7 p. 100, soit en nombre rond 18 p. 100 en faveur du réseau de l'État est donc un minimum lorsqu'on met en parallèle les dépenses relatives au transport d'une tonne brute à 1 kilomètre.

Décomposition de l'économie de 30 *p.* 100 *sur les prix de revient de l'unité de trafic.* — Telle serait l'économie, soit 18 p. 100 au moins, si un même poids brut correspondait à un même poids utile ou plutôt à un même nombre d'unités de trafic. Or, nous avons vu que l'économie rapportée à l'unité de trafic s'élève à

30 p. 100;

(*) Voir pour les *rampes caractéritiques* la notice sur les prix de revient de la traction : *Annales des ponts et chaussées*, septembre 1885; *Annales des mines*, janvier-février 1886.

cette économie se décompose dès lors approximativement de la manière suivante :

Part afférente à la meilleure utilisation des places offertes.	12 p. 100
Part afférente à la production plus économique du travail moteur et à un rendement plus élevé.	18 p. 100
Ensemble.	30 p. 100

Notre but est atteint : nous avons montré comment on peut suivre dans ses diverses manifestations l'une des branches de l'exploitation des chemins de fer; nous avons choisi la traction et nous avons constaté d'abord l'influence considérable que peut avoir une utilisation plus complète de la place offerte. Un véhicule comprend en moyenne 40 places disponibles, il suffit de remplir 7,5 places au lieu de 6,5 pour faire baisser le prix de l'unité de trafic de plus de 13 p. 100.

Nous avons montré ailleurs comment diverses modifications apportées aux machines-locomotives, *soupapes de rentrée d'air*, *tiroirs cylindriques*, *surfaces de moindre résistance*, *écrans réfractaires* (*), etc., pouvaient augmenter la puissance de ces machines, élever le coefficient d'adhérence et améliorer le rendement. D'autre part, sur les lignes à très faible trafic du réseau de l'État les prix de la traction ont considérablement baissé par l'adoption de machines-fourgons d'un type spécial, conduites par un mécanicien sans chauffeur, graissées à l'huile minérale, s'usant peu et brûlant peu de charbon. Ce sont les résultats obtenus dans cette voie qui se traduisent par l'économie de 18 p. 100. En appliquant cette réduction de 18 p. 100 à l'ensemble des dépenses de traction des exercices 1884 et 1885, ci

$$193.447.647^{f} + 180.007.620^{f} = 373.455.267^{f}.$$

(*) Voir *Annales des ponts et chaussées*, avril 1884 et septembre 1885; *Annales des mines*, juillet-août 1884 et janvier-février 1886.

On obtient pour les six grands réseaux une diminution de dépenses de :

$$373.455.267^f \times 0,18 = 67.222.000^f,$$

soit par exercice en moyenne

$$\frac{67.222.000^f}{2} = 33.611.000^f.$$

Examen spécial de l'économie sur l'article graissage. — Pour certains articles de dépenses, l'économie réalisée est considérablement plus élevée que 18 p. 100 ; on le conçoit, puisque le coefficient de réduction, 18 p. 100, est la valeur moyenne de la réduction de tous les articles du budget de la traction. Nous citerons comme cas particulier les dépenses de graissage des locomotives et des véhicules.

On sait que l'application de *soupapes de rentrée d'air* a permis de substituer d'un manière exclusive l'huile minérale aux huiles végétales, graisses, suifs, etc. La première application de ces soupapes remonte au mois d'avril 1882; depuis cette époque, ces soupapes ont été le point de départ d'une série d'améliorations successivement constatées : elles n'ont jamais donné lieu à aucun inconvénient. Elles sont aujourd'hui appliquées à plus de 250 machines et notamment à toutes celles du 2e arrondissement des chemins de fer de l'État dont le centre est à Tours (*).

La dépense de graissage qui était avant l'emploi des soupapes de

$$14^f,04$$

par 1.000 kilomètres de train sur le réseau de l'État est

(*) Ces soupapes de rentrée d'air sont aujourd'hui appliquées sur une grande échelle aux États-Unis où elles sont combinées avec des tiroirs équilibrés. — On les retrouve en Suisse, en Allemagne, en Autriche-Hongrie. — Elles sont adoptées pour les machines du Saint-Gothard.

aujourd'hui de

$$6^f,72$$

pour le 2e arrondissement; l'économie est, on le voit, non plus de 18 p. 100, mais de

$$\frac{14.04 - 6,72}{14,04} = 52 \text{ p. } 100.$$

Le succès si complet obtenu pour le graissage des machines et des tenders a fait étendre l'emploi de l'huile minérale à tous les véhicules, sans exception, des chemins de fer de l'État. Le prix de revient du graissage des véhicules qui s'élevait avant l'emploi des huiles minérales à

$$7^f,21 \text{ par } 1.000 \text{ kilomètres de train}$$

est descendu à

$$1^f,22, \text{ en } 1886.$$

L'économie atteint ici des proportions inattendues, savoir :

$$\frac{7,21 - 1,22}{7.21} \quad \text{ou} \quad 83 \text{ p. } 100.$$

Si on réunit l'ensemble des dépenses de graissage avant l'emploi des huiles minérales, on obtient pour 1.000 kilomètres de train :

$$14^f,04 + 7^f,21 = 21^f,25.$$

Depuis l'emploi exclusif de ces huiles la dépense n'est plus que de

$$6^f,72 + 1^f,22 = 7^f,94,$$

l'économie sur l'ensemble de graissage est de

$$\frac{21,25 - 7,94}{21,25} = 62 \text{ p. } 100.$$

Les dépenses de graissage pour l'ensemble des réseaux français s'élèvent par an, en nombre rond, à

$$7.500.000^f;$$

on voit que l'économie de 62 p. 100 sur ce seul article des

dépenses de la traction correspond à :

4.650.000f

et dépasse la huitième partie de l'économie totale (33.611.000 francs) annoncée plus haut. N'y a-t-il pas quelque réserve à faire : ce nouveau graissage ne produit-il pas quelque détérioriation physique ou chimique qui, en augmentant les frais d'entretien, vienne entamer, au moins dans une certaine mesure, le bénéfice si considérable de 62 p. 100? Nullement; pour les locomotives, par exemple, les polis des cylindres et des tiroirs deviennent miroitants, les pistons, les fonds des cylindres, les bords des lumières, les conduits et les valves d'échappement présentent des surfaces propres et nettes, sans le moindre dépôt adhérent; les tôles des chaudières sont garanties contre la principale cause des corrosions chimiques (les acides des corps gras).

Pour les véhicules, la consommation des tampons graisseurs est diminuée des deux tiers, la période des levages est triplée ; le service du graissage est, en outre, extraordinairement simplifié. Il n'y a plus ni graisses ni suifs pour les machines, ni huile d'hiver et huile d'été pour les véhicules, ni graisses de compositions diverses. Une seule espèce d'huile suffit à tout, en hiver comme en été, et cette huile minérale qui est absolument neutre, qui se conserve indéfiniment, qui est inaltérable à l'air, qui ne forme aucun dépôt ni cambouis, cette huile est en même temps la moins chère de toutes les huiles, puisqu'elle ne coûte que

24f,00 les 100 kilogrammes.

Tiroirs cylindriques et surfaces de moindre résistance. — Voilà des économies dont la réalisation est acquise au réseau de l'État sur une vaste échelle.

Rappelons que sur ce même réseau l'application de tiroirs cylindriques a démontré que la durée de ces tiroirs

dépassait soixante fois la durée des tiroirs ordinaires et que l'usure de toutes les pièces de la distribution est pour ainsi dire radicalement supprimée. C'est aussi sur ce réseau que la substitution de *surfaces de moindre résistance* à toutes les surfaces normales à la marche a prouvé expérimentalement qu'on peut par ce moyen si simple augmenter de 13 p. 100 le rendement en travail utile des machines locomotives remorquant des trains express à la vitesse moyenne de 70 kilomètres.

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, la locomotive est loin d'être arrivée à la perfection qu'on lui suppose généralement. Beaucoup de recherches fructueuses restent à faire. Mais les services de l'exploitation proprement dite et de l'entretien de la voie ne présentent-ils pas aussi bien des sources d'économie auxquelles on pourrait puiser abondamment ?

La répartition et l'utilisation du matériel roulant pourraient faire l'objet d'un utile examen. L'augmentation de la longueur des rails et une disposition rationnelle des joints exercerait sur l'entretien des voies une influence salutaire. Dans la présente notice, nous avons limité nos recherches à la traction seulement : nous formons le vœu que des recherches analogues s'étendent aux autres branches de l'exploitation.

L'abaissement des prix de revient s'impose aujourd'hui aux grandes compagnies comme une nécessité absolue. A côté de la France, les efforts sont incessants : le transit nous échappe, c'est la lutte pour l'existence.

Conclusion. — Dans un premier chapitre, nous avons representé graphiquement les documents statistiques publiés par le Ministre des Travaux publics sur les dépenses et les recettes des Chemins de fer français ; les diagrammes déduits de l'observation directe des faits ont été traduits par une formule donnant une relation

très simple entre les prix de revient de l'unité de trafic et la fréquentation.

Dans un deuxième chapitre nous avons énuméré les lois contenues dans cette formule empirique et notamment l'invariabilité des prix de revient pour une même fréquentation générale, l'établissement d'une répartition stable du trafic, et des règles élémentaires pour comparer les prix de revient de divers exercices et de divers réseaux.

Dans un troisième chapitre, nous avons cherché à faire ressortir la possibilité d'abaisser dans une proportion notable les prix de revient des transports ; un examen détaillé de l'une des branches de l'exploitation, *la traction*, a montré que sur le réseau de l'État un abaissement de 18 p. 100 au moins avait été réalisé dans cette branche à l'aide de quelques modifications à la fois simples et rationnelles des locomotives actuelles.

Un abaissement équivalent réalisé à bref délai dans toutes les branches de l'exploitation pourrait seul permettre d'espérer l'avènement d'une nouvelle ère de prospérité pour les Chemins de fer français. Les dépenses d'exploitation s'élèvent en nombre rond à 600 millions ; un abaissement de 18 p. 100 correspondrait à une économie annuelle de 108 millions et à une augmentation équivalente du produit net.

Mais si, au contraire, nul changement n'intervient, on peut prévoir avec une exactitude pour ainsi dire mathémathique l'époque à laquelle la situation financière des Compagnies deviendra inquiétante. Les lignes nouvelles complètent ou multiplient les mailles du réseau français : elles ouvrent sur beaucoup de points du territoire des voies plus directes, et tendent en raccourcissant les distances à diminuer le nombre *d'unités de trafic :* ce nombre est en effet le produit de deux facteurs, le tonnage et le parcours moyen. Si la masse à remuer restait *inva-*

riable, l'influence des moindres parcours s'exercerait dans sa plénitude. Nous admettrons que dans les circonstances actuelles, pour une période de huit ans (de 1883 à 1891), le trafic local récolté par les lignes nouvelles suffira pour compenser la réduction des distances ; nous admettrons en outre que les tarifs moyens qui ont suivi jusqu'à présent une marche décroissante ne subiront pendant cette période aucun nouvel abaissement. Notre hypothèse se traduit par l'invariabilité des recettes brutes pour l'ensemble des grands réseaux de 1883 à 1891 en négligeant les fluctuations accidentelles et ne considérant que le niveau moyen.

Désignons par :

L la longueur exploitée en 1883, par F la fréquentation;
P_α le prix de revient du millier d'unités de trafic, par D les frais totaux d'exploitation ;
L', F', P'_α et D' les mêmes éléments pour l'exercice 1891, nous aurons par définition

$$D = P_\alpha L F, \quad D' = P'_\alpha L' F'.$$

Remplaçons P_α et P'_α par leurs valeurs en fonctions de la fréquentation F et F', nous aurons pour 1883 :

$D = 6.125 \times L + 21,50\,FL$, et pour 1891 $D' = 6.125 + 21,50\,F'L'$,

et comme $F'L' = FL$, nous aurons

$$D' - D = 6.125\,(L' - L).$$

Telle est, dans les circonstances actuelles, la formule de la variation des frais d'exploitation en fonction du développement des lignes ferrées. Comme la recette brute totale est supposée constante, le produit net diminuera d'une somme égale à l'augmentation des frais d'exploitation $(D' - D)$: de là découle cette règle très simple que chaque millier de kilomètres nouveaux ajoutés au réseau des grandes Compagnies tel qu'il était constitué avant les conventions de 1883 aura pour conséquence une diminution du produit net général de 6.125.000 francs.

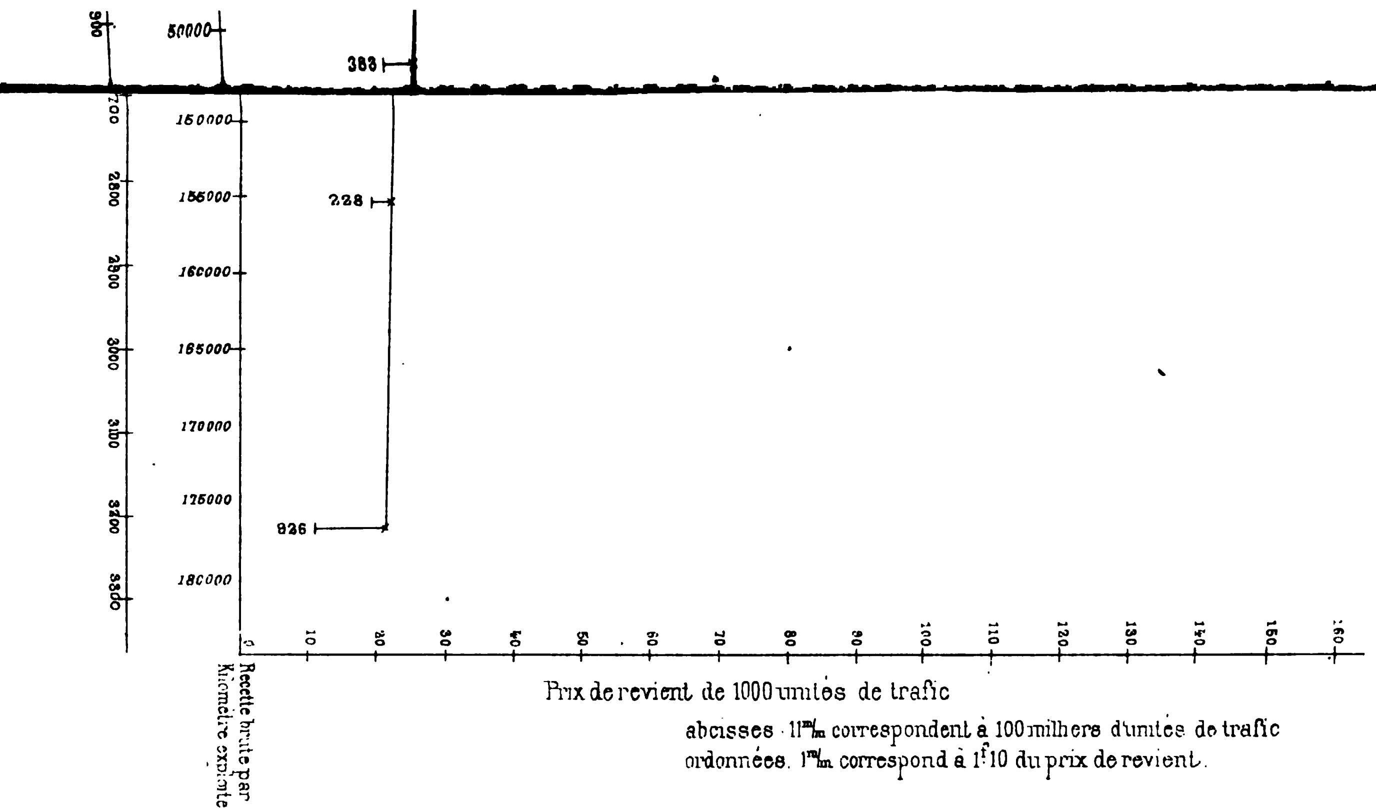
Parallèlement aux réductions de plus en plus fortes du produit net viendront s'aligner des annuités au (*) moins doubles pour les dépenses de construction supportées par l'État, sans compter l'augmentation de la dette des compagnies, qui croîtra d'environ 50 millions, à raison de 50.000 francs par kilomètre (25.000 francs pour la superstructure et 25.000 francs pour le matériel roulant). C'est en nombre rond une charge annuelle de 20 millions par millier de kilomètres.

Le produit net total des six grands réseaux a été, en 1883, de 506 millions; le service des emprunts a absorbé 380 millions; il est donc resté pour les intérêts et le dividende du capital social 126 millions. Il ne faudra pas, on le voit, ajouter au réseau de 1883 beaucoup de milliers de kilomètres, pour qu'en 1891 les sommes payées par l'État, soit à titre de garantie, soit à titre d'annuités, atteignent et dépassent le montant total des dividendes de toutes les Compagnies françaises.

La situation financière n'apparaîtra peut-être pas immédiatement avec ce caractère aigu, parce que les insuffisances des lignes nouvelles peuvent, d'après les conventions de 1883, être portées au compte du premier établissement; mais cet artifice de comptabilité, en laissant apparaître un produit net fictif plus élevé que le produit net réel n'apportera par lui-même aucun remède au mal: le seul remède efficace, et c'est là notre conclusion, consiste dans l'arrêt des dépenses de construction des lignes improductives et dans la réduction des dépenses d'exploitation des grands réseaux français.

Paris, le 22 février 1887.

(*) Les travaux faits par les Compagnies pour le compte de l'État sont remboursés par des annuités payées aux Compagnies; et les travaux faits directement par l'État incombent à la Dette publique et sont payés en rentes sur l'État (3 p. 100 amortissable): c'est un autre genre d'annuités.

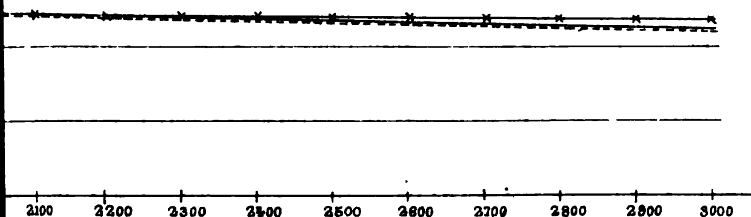

383
228
926
150000
155000
160000
165000
170000
175000
180000
50000
2700
2800
2900
3000
3100
3200
3300
900
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
Recette brute par
Kilomètre exploité
Prix de revient de 1000 unités de trafic
abcisses : 11m/m correspondent à 100 milliers d'unités de trafic
ordonnées. 1m/m correspond à 1f10 du prix de revient.

afic

2100

rafic.

afic



rafic.

Auto. Imp. A. Hoeise & Courtier, 48, r. de Dunkerque.

A

TABLEAU DE TOUTES LES LIGNES DES SIX GRANDS RÉSEAUX FRANÇAIS CLASSÉES PAR RECETTES KILOMÉTRIQUES CROISSANTES.

Année 1883.

RÉSEAUX	DÉSIGNATION DES LIGNES	NUMÉROS D'ORDRE	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales	COEFFICIENTS d'exploitation
1	2	3	4	5	6	7	8
Lyon	Uzès à Nozières	1	5	1 300	6 500	31.200	480,0
Midi	Mont-de-Marsan à Roquefort		23	2.222	51.105	134.204	262,8
Est	Ouville à Thiancourt		10	2.246	22.459	104.965	467,3
—	Embranchement de la vallée de l'Orne		4	2.369	9.477	47.738	503,7
—	Lunéville à Gerbéviller		10	2.454	24.536	94 865	386,6
—	Toul à Favières		33	2.715	89.606	194.679	217,3
—	Pompey à Nomény		22	2.743	60.353	123.668	204,9
—	Embranchement du Val-d'Ajol		17	2.753	46.794	152 889	326,7
		2	119	2.257	304.330	853.008	280,2
Lyon	Thonon à Evian		9	3.200	28 800	91 600	318,0
Est	Baccarat à Badouviller		14	3.266	45.721	83.773	183,2
Lyon	Dijon à Saint-Amour		81	3.500	288.000	581.600	202,0
Est	Aillevillers à Plombières		11	3.610	39.715	127.319	320,6
		3	115	3.498	402.236	884.292	219,8
Lyon	Aubenas à Prades		10	3.700	37.400	114.700	307,0
—	Gray à Fraisans		44	3.900	171.700	347.000	202,0
Est	Vitrey à Bourbonne-les-Bains		15	3.951	59.270	164 293	277,2
Lyon	Remoulins à Uzès		19	4.000	76.300	154.600	203,0
Est	Bondy à Aulnay-les-Bondy		8	4 053	32.426	75.420	232,6
—	Langres à Andilly		17	4.058	68 979	127.727	185,2
Lyon	Bourron à Malesherbes		25	4.100	103.700	205.800	198,0
—	Montagney à Miserey		28	4.200	118.300	186.800	158,0
—	Clamecy à Cercy-la-Tour		81	4.200	344.000	576 900	168,0
		4	247	4.097	1.012.075	1.953.240	193,0
Lyon	Avallon à Dracy-Saint-Loup		70	4.500	315.000	486 900	155,0
Est	Conflans à Briey		14	4.545	63.624	100.588	158,0
Lyon	Annemasse à La Roche		7	4.600	32.600	53.100	163,0
—	Pont-de-Dou à Aubert		12	4.700	55.900	83.000	114,0
—	Embranchement de Digne		22	4.700	103.900	169.300	163,0
Est	Mançois-le-Petit à Gan et Neufchâteau		67	4.859	325.558	371.127	114,0
Ouest	Pontivy à Saint-Brieuc		72	5 026	361.895	945 792	261,3
Est	Champigneulles à Jarville		7	5.086	35.600	94 089	264,3
		5	271	4.775	1.294.077	2.303.896	178,0

RÉSEAUX	DÉSIGNATION DES LIGNES	NUMÉROS D'ORDRE	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales	COEFFICIENTS d'exploitation
1	2	3	4	5	6	7	8
Lyon	Virieu-le-Grand à Saint-André-le-Gaz. .		15	5.200	78 400	105.800	136,
P -O.	Embranchement de Romorantin		7	5.385	37.694	107.070	284,
Midi	Tournevire à Saint-Affrique.		15	5 517	82.748	150.270	181,
Lyon	Embranchement d'Hyères.		18	5.700	103.500	231.000	223,
—	Cavaillon à Apt.		32	5.700	183.100	206.400	113,
—	Nîmes à Saunières.		24	5.900	141.100	309.200	220,
Est	Coulommiers à La Ferté-Gaucher.		20	6.095	121.894	201.513	165,
Lyon	Livron à Crest.		17	6.300	107.000	153.600	144,
—	Embranchement d'Albertville.		22	6.300	138.300	179.900	130,
—	Belleville à Beaujeu		13	6.500	85.100	144.800	170,
—	Vichy à Thiers		33	6.500	214.500	225.600	105,
—	Gap à Briançon.		26	6.800	178.200	202.700	150,
—	Andelot à Champagnolle.		13	6.900	89.500	141.100	158,
Est	Remiremont au Thillot et Saint-Maurice.		29	6.910	200.400	256.734	128,
		6	284	6.202	1.761.436	2.615.687	148,
Est	Amagne à Vouziers et Apremont.		65	6.941	451.141	673.859	149,
Lyon	Remoulins à Beaucaire		5	7.100	35.500	41.900	118,
P.-O.	Aubigné à La Flèche.		34	7.113	241.858	213.614	88,
Lyon	Embranchement de l'Auzonnet.		20	7.200	143.300	163.800	114,
Est	Lérouville à Sedan.		143	7.369	1.053.765	953.489	90,
Lyon	Les Arcs à Draguignan		13	7.600	99.800	165.700	166,
—	Coulonges à Thonon.		63	7.600	474.900	666.300	140,
Nord	Chantilly à Crépy-en-Valois.		34	7.823	266.000	349.000	131,
Lyon	Sorgues à Carpentras		17	8.000	135.200	180 000	133,
Est	Châtillon à Chaumont		43	8.184	351.915	469.405	133,
		7	437	7.445	3.253.379	3.877.067	119,
Midi	Condom à Port-Sainte-Marie.		40	8.208	328.312	348.801	106,
Est	Montmédy à Virtou.		3	8.282	24.845	114.037	459,
Nord	Cambrai à Dour		51	8.294	423.000	560.000	132,
Midi	Montréjeau à Luchon.		35	8.406	294.215	266.912	90,
P.-O.	Pithiviers à Malesherbes et Orléans . . .		59	1.601	521.431	480.931	92,
Lyon	Pontarlier à Jougne		23	8.800	203.000	222.100	109,
—	Nîmes au Caylar		19	9.000	170.200	237.300	1[illegible]
—	Cravand aux Laumes		91	9.000	814.300	945.500	116,
Est	Arches à Saint-Dié et embranchements.		74	9.019	667.412	623.711	93,
		8	395	8.726	3.446.715	3.799.292	110,
Lyon	Grenoble à Gap.		135	9.100	1.223.200	1.371.800	112,
P.-O	Orléans à Gien		64	9.131	575.276	450.740	7[illegible]
—	Nantes à Châteaubriant.		63	9.180	578.352	516.358	8[illegible]
Midi	Lourdes à Pierrefitte.		20	9.180	183.598	185.025	100
Lyon	Santenay à Etang.		59	9.200	544.200	764.700	141,
Midi	Langon à Bazas.		20	9.315	186.294	201.555	108,
Est	Flamboin à Montereau.		28	9.380	262.635	263.189	100,
P.-O.	Libos à Cahors		51	9.396	479.180	435.561	90,
Ouest	Laigle à Couches.		40	9.633	385.327	353.248	91,
		9	480	9.204	4.418.062	4.542.176	102,

RÉSEAUX 1	DÉSIGNATION DES LIGNES 2	NUMÉROS D'ORDRE 3	LONGUEUR moyenne exploitée 4	RECETTES par kilomètre 5	RECETTES totales 6	DÉPENSES totales 7	COEFFICIENTS d'exploitation 8
P.-O.	La Possonnière à Niort.		164	9 710	1.592.431	1.383.264	86,9
Lyon	Embranchement d'Aubenas.		9	9.900	88 800	107.400	121,0
—	Nuits à Châtillon.		36	9.900	356.000	275.100	77,0
—	Cannes à Grasse		17	9.900	169.400	265.500	157,0
—	Lunnel à Aigues-Mortes		12	10.100	121.100	177.600	147,0
—	Aix à Carnoules.		78	10.300	800 800	589.400	74,0
Midi	Millan à Rodez		75	10,346	775 938	847 049	109,2
Nord	Arras à Etaples et Abbeville à Béthune.		187	10.540	1.971.000	2.038.000	103,2
		10	578	10.165	5.875.469	5.683.313	96,7
Lyon	Aix-les-Bains à Annecy		39	10.700	416.800	538 600	129,0
Midi	Paulhan à Fougères.		28	10 879	304.619	273 323	89.7
Lyon	Auxerre à Nevers.		127	11.000	1 400.400	1,271.200	91.0
Nord	Beauvais à Gournay		28	11.071	310 000	323.000	104,2
Lyon	Montbéliard à Delle		26	11.100	287 200	392.300	137,0
Midi	Foix à Tarascon.		16	11 259	180.139	214 757	119,2
Ouest	Laval à Gennes-Longuefuye.		30	11.416	342.495	392 272	114,5
—	Segré à Angers.		39	11 416	445.234	321.423	72.2
Midi	Toulouse à Auch		83	11.469	951 887	619.495	65.1
Lyon	Cavaillon à Veynes.		175	11 500	2 016.700	1.482 300	74,0
		11	591	11.261	6 655.474	5 828.670	87,5
Ouest	Lison à Lamballe.		202	11.759	2 375.432	1 879.098	79,1
P.-O.	Figeac à Arvant		171	12.437	2.126.714	1 637.864	77,0
Lyon	Clermont à Montbrison		110	12.500	1 373.900	1.201.400	87.0
Midi	Carcassonne à Quillau.		55	12.633	694.804	602 090	86,7
—	Agde à Lodève		61	12.756	778.100	721.333	92,7
Lyon	Saint-Rambert à Annonay.		19	12.900	245.900	353.400	144,0
		12	618	12.289	7.594 850	6 395.185	84,2
Ouest	Sablé à Châteaubriant		95	13,154	1.249 711	923 157	73,9
Midi	Latour à Millau.		72	13 655	983.151	996.203	101,3
—	Agen à Vic-en-Bigorre.		130	13 799	1.793.876	1.243.400	69,3
Lyon	Besançon à Vesoul		63	13.800	869 400	925.100	107,0
P.-O.	Brétigny à Tours (par Vendôme).		202	14 154	2.859 029	2.795 569	97,4
—	Savenay à Landerneau et Pontivy		350	14 194	4.967.791	3.107.419	62,5
Lyon	Saint-Just à Montbrison.		22	14 200	312 400	338.000	108,0
		13	934	13.956	13.035.358	10.328 848	72,2
Ouest	Rennes à Redon		70	14.337	1.005.617	816.637	81,4
Est	Neufchâteau à Epinal		76	14.547	1.105.567	869.533	78.6
P.-O.	Libourne au Buisson.		96	14.637	1.405.176	934.930	66.5
Midi	Castres à Mazamet.		19	14.949	284 042	189.044	66,5
P.-O.	Poitiers à Saint-Sulpice-Laurière.		111	15 025	1.667.750	1.274.606	76,4
Lyon	Paray-le-Monial à Roanne.		57	15 100	860.700	496 500	58,0
Est	Vézelise à Mirecourt.		24	15 630	375.110	262 543	69,1
—	Epernay à Romilly.		84	15.907	1 336.171	1,563.230	117,0
Midi	Tarbes à Bagnères.		22	15 952	350.948	227.788	64,9
Est	Chalindrey à Mirecourt		88	16.197	1.425.361	1.092.595	76,6
		14	647	15.169	9.814.442	7.727.406	78,7

RÉSEAUX	DÉSIGNATION DES LIGNES	NUMÉROS D'ORDRE	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales	COEFFICIENTS d'exploitation
1	2	3	4	5	6	7	8
Ouest	Beuzeville à Fécamp		20	16.434	328 678	278.139	84,
Lyon	Rognac à Aix		25	16 600	414.200	255.100	62,
P.-O.	Nantes à La Roche		75	16.798	1.259 881	992.661	74,
Ouest	Caen à Laval		144	16.959	2.422.218	1.869 603	76,
Est	Aillevillers à Lure		31	17 156	531 823	351.911	66,
Lyon	Avignon à Miramas		69	17 300	1.196 800	952.700	80,
—	Saint-Etienne au Puy et à Saint-Georges		138	17 500	2.416.200	2.227.500	92,
		15	502	17.110	8.589 500	6.867 614	79,
Est	Longueville à Provins		7	17.600	123.270	219.399	178,
Midi	Mont-de-Marsan à Tarbes		99	17.811	1.763 244	1 079.079	61,
Lyon	Lunel au Vigan		73	17.900	1.309.900	1.073.300	82,
—	Pertuis à Aix		32	18.000	577.400	503.300	87,
Midi	Dax à Ramons		31	18.671	578 795	375.676	64,
—	Boussens à Saint-Girons		33	18.783	619.829	402.309	64,
Est	Bar-sur-Seine à Châtillon		32	19 198	614.350	382 459	62,
—	Chaumont à Pagny-sur-Meuse		95	19.271	1.830.714	1.342.115	73,
—	Nancy à Château-Salins et à Vic		24	19.511	468.263	690 125	147,4
Midi	Carmaux à Albi		15	19.619	294.742	295.049	100,1
Lyon	Saint-Germain-des-Fossés à Vichy		9	19 800	178.400	223.900	126 0
—	Aubagne à Valdonne		17	19.800	336.700	185.100	55,0
		16	467	18.620	8 695 607	6.771.811	77,8
Ouest	Rennes à Brest		249	20.092	5 002.927	3.270.864	65,4
—	Argentan à Granville		129	20.173	2.602.270	2.855.028	109,7
Est	Epinal à Remiremont		24	20 182	484.360	408.200	84,6
Ouest	Paris à Dieppe		139	20.644	2.869.563	2.288.621	79,7
Lyon	Bourg à Besançon		140	20 700	2.895.500	2.006.400	69.0
Midi	Castelnaudary à Castres		55	20.703	1.138 697	757 857	65.5
Lyon	Brioude à la Levade		169	21 000	3.555.200	2.270.100	64,0
Midi	Saint-Simon à Foix		71	21 418	1.520.688	706.898	46,5
Est	Gretz à Coulommiers		33	21.801	719.431	504 151	70,1
		17	1009	20.603	20.788.636	15.067.659	72,4
Est	Lunéville à Saint-Dié		50	21.901	1 095.064	662.098	60,5
Midi	Castres à Albi		49	22.537	1.104.328	734.983	66,5
Ouest	Rennes à Saint-Malo		81	22.879	1.853.254	1.384.965	74,7
		18	180	22.515	4.052.646	2.782.046	68,6
Lyon	Vézenobres à Quissac		27	23.500	637.700	481.000	76,0
P.-O.	Limoges à Brives		101	23.566	2.380.197	1.682 863	70,7
Lyon	Le Clapier à la Beraudière		3	23.600	70.900	97.000	137,0
—	Moulins à Montchanin		117	23 800	2 781.700	1.708 900	61.6
Midi	Roanne à Lyon		76	24 000	1 832.200	1.282.000	70,0
Est	Montauban à Capd. Rodez, Decaz		201	24.221	4.868.448	2.950.296	60,6
Ouest	Mouchard aux Verrières		73	24.300	1.775 100	943 500	53,0
P.-O.	Nancy à Gray		176	24 527	4.316.672	2.979.386	69,0
		19	774	24.112	18.662.937	12.124.945	64,9

RÉSEAUX	DÉSIGNATION DES LIGNES	NUMÉROS D'ORDRE	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales	COEFFICIENTS d'exploitation
1	2	3	4	5	6	7	8
Est	Longwy à Villerupt		17	25.106	426.804	365 556	85,6
Lyon	Valence à Moirans		78	25.200	1.964 100	1.111.500	57,0
P.-O.	Bourges à Montluçon		100	25.231	2.523.119	1.232 465	52,8
—	Montluçon à Saint-Sulpice et Aubusson		146	25.580	3.743.636	2.315.659	62,0
Midi	Graisse-sac à Béziers		52	25.604	1.336.109	1.095 665	82,0
Est	Troyes à Bar-sur-Seine		29	25.676	744.614	597.418	80,2
Ouest	Lizieux à Honfleur et Trouville		51	25.750	1.390.524	1.525.014	109,7
P.-O	Poitiers à La Rochelle et Rochefort		158	25.921	4 095 586	2.521.304	61,6
		20	634	25.590	16.224 492	10.864 561	66,9
Est	Nancy à Vézelise		34	26.455	8.899.484	871.130	96,8
Lyon	Grenoble à Montmélian		50	27.000	1.348.200	694 000	51,0
Midi	Port-Vendres à Port-Bon		14	27.084	379.171	618.944	163,2
Lyon	Livron à Privas		32	27.100	866.400	551.300	64,0
Midi	Morcenx à Mont-de-Marsan		39	27.480	1.071.707	513.651	47,8
P.-O.	Moulins à Montluçon, Bezen, Gannat, Saint-Eloi		150	27.856	178.441	2 438.909	58,4
		21	319	27.408	8.743 403	5 687.934	65,0
Lyon	La Roche à Auxerre		19	28.200	534.900	362.800	68.0
Est	Reims à Metz		172	28.752	4 614 350	2.878.447	58,6
Lyon	Marseille à Aix		35	28.800	1.006.600	1.013.300	101,0
Midi	Toulouse à Bayonne		321	28.812	9.248.842	6.003 103	64,9
Ouest	Caen à Cherbourg		131	28.981	3.796.457	2 089.667	55,0
Lyon	Chagny à Nevers		163	29.000	4.726 200	2.702.500	57,0
P.-O.	Tours au Mans		94	29.235	2.748 125	1.502.203	54,7
		22	935	28.530	26.675.474	16.552.020	62,0
Nord	Creil à Beauvais		37	30.216	1.118.000	890 000	79,6
Midi	Paulhan à Montpellier		42	30.262	1.271.022	921 570	72,5
P.-O.	Coutras à Périgueux		75	30.351	2.276.332	1 175.323	51,6
—	Limoges à Nexon, à Agen, à Vill[ne]-s.-Lot.		239	30.437	7.274.437	3.928.240	54,0
Lyon	Lyon à Grenoble et St-Rambert à Brives.		179	30.800	5.506 900	3.882.600	70,0
—	Châlon à Dôle		76	31.100	2.368.200	1.066 000	45,0
		23	648	30.578	19.814 891	11,863.733	59,8
P.-O.	Paris à Orsay et Limours		43	32.748	1.408.181	1.118.365	79,4
Lyon	Arles à Lunel		45	32.900	1.481 400	792.600	54,0
Nord	Amiens à Tergnier		71	32.972	2.341 000	1.509.000	64,5
Lyon	Dijon à Belfort, Gray à Saluis		259	33.300	8.633.000	4.996.500	58,0
Est	Longuyon à Pagny-sur-Moselle		70	33.554	2.348.777	1.201.558	51,2
Ouest	Le Mans à Angers		95	34.055	3.235.256	2.491.382	77,0
Nord	Soissons à la frontière belge, par Hirson et Anor		105	34.686	3.642.000	2.167.000	59,5
Est	Mézières à Hirson		55	34.933	1.921.308	1.341.231	69,8
—	Belfort à Morvillars		12	35.384	424 603	534.132	125,8
P.-O.	Niversac-Capdenac-Tulle		182	36.826	6.702.325	3.825.171	57,1
		24	937	34 298	32.137,850	19.977.139	62,1

RÉSEAUX	DÉSIGNATION DES LIGNES	NUMÉROS D'ORDRE	LONGUEUR moyenne exploitée	RECETTES par kilomètre	RECETTES totales	DÉPENSES totales	COEFFICIENTS d'exploitation
1	2	3	4	5	6	7	8
Est	Blesmes-Chaumont et Chalind. à Gray..		131	38.055	4.985.165	2.497.566	50 0
Midi	Perpignan à Port-Vendres..........		30	38.086	1.142.576	765 118	67,0
Lyon	Villeneuve-Saint-Georges à Montargis. .		110	38.200	4 198.100	2.594.300	62,0
Nord	Amiens à Rouen..............		87	38.287	3.331.000	1.713.000	51,4
Ouest	Le Mans à Mézidon et Falaise......		145	38.442	5.574.048	5.013 243	54,1
—	Saint-Cyr à Sardou.............		160	38.481	6.156.886	3.540.976	57,5
P.-O.	Toulouse à Lexos et Albi..........		106	38.683	4.100.395	2.344.654	57,2
Lyon	Mâcon à Lyon et Genève (partie suisse).		15	39 100	587 100	749.900	108,0
Est	Chalindrey à Is-sur-Tille..........		44	40.400	1.777.611	888.278	49,9
		25	828	38.469	31 852.881	20.107.035	63,1
Ouest	Rouen à Serquigny.............		57	43.030	2 452.727	1.737.288	70,8
Nord	Boulogne à Calais............		40	43.575	1.743.000	1.015.000	58,2
Midi	La Mothe à Arcachon............		16	44.077	705 228	338.004	47,8
Lyon	Saint-Germain-des-Fossés à Brioude. . .		134	44.700	5.993.600	3.482.700	58,0
Nord	Valenciennes à Aulnoye..........		35	44.743	1.566.000	927.000	59,1
Lyon	Marseille au Prado............		3	47.500	142.400	334.800	235,0
—	Robiac au Pouzin..............		95	47 300	4.501 600	1.970.300	44,0
P.-O.	Tours à Nantes et Saint-Nazaire.....		260	48.781	12.683.061	5.949.080	46,9
Nord	Longueau à Estrée-Saint-Denis......		57	48 848	1.612.000	874 000	54,2
Est	Ardennes à Thionville...........		401	49.162	19.713 853	10.809.740	54,8
		26	1098	46.551	51.113.469	27.437.912	53,6
Lyon	Toulon à la frontière d'Italie.......		185	51.700	9.565.000	5.350.000	56,0
Midi	Bordeaux à Bayonne............		198	51.910	10.278.258	4.926.193	47,8
		27	383	51.810	19 843 258	10.276.193	51,8
Nord	Tergnier à Laon..............		30	55 267	1.658.000	1 026.000	61,9
Lyon	Moret à Roanne..............		355	56.100	19 910.800	9.202 100	46,0
—	Bessèges à Alais..............		33	56.600	1.867.300	904.100	48,0
—	Nimes au Teil...............		119	58 000	6.901.600	2.386 400	35,0
—	Mâcon et Lyon à Genève (partie française)		220	58.800	12 933.400	7 654.400	59,0
		28	757	57.161	43.271.100	21.173.000	48,9
Midi	Narbonne à Perpignan..........		61	60.066	3 844.209	1.504.634	39,1
P.-O.	Orléans à Vierzon, Sameadze et Limoges.		369	60.080	22 169.436	8.478.139	38,2
Ouest	Malanvay à Dieppe.............		50	60.410	3.020.479	1.424.851	47,2
—	Nantes à Caen...............		182	61.072	11.115.121	5.139.938	46.2
Est	Noisy-le-Sec à la frontière.........		446	61 610	27.478.215	16.548.058	60,2
—	Châlons à Mourmelon..........		25	62.599	1.564.970	1.569.233	100,3
		29	1136	60.908	69.192.430	34.674.853	50,0
Lyon	Givors à La Voulte............		106	69 100	7.322.200	2.056.000	28,0
Est	Epernay à Reims..............		30	69 414	2.082.425	1.297.170	62,3
Ouest	Paris à Rennes...............		374	70.614	26.409.674	11.126.079	42,1
	A reporter...........		510	69.709	35.814.299	14.479.249	44,1

RÉSEAUX 1	DÉSIGNATION DES LIGNES 2	NUMÉROS D'ORDRE 3	LONGUEUR moyenne exploitée 4	RECETTES par kilomètre 5	RECETTES totales 6	DÉPENSES totales 7	COEFFICIENTS d'exploitation 8
	Report.		510	69.709	35.814.299	14.479.249	41,1
Nord	Busigny à Samain		49	71.633	3.510.000	1.916.000	54,6
—	Paris-Soissons et Villers-Cotterets à Port-aux-Perches		110	72.027	7.923.000	3.823.000	48,2
Est	Frouard à la frontière		32	73.881	2.364.193	1.649.218	69,8
Nord	Amiens à Boulogne et Saint-Valéry		129	74.163	9.567.000	4.795.000	50,1
—	Aulnoye à Anor		31	75 387	2.336.000	1.035.000	44,2
—	Lille à Calais, Hazebrouck à Dunkerque.		146	79.075	11.545 000	5.798.000	50,2
Lyon	Marseille à Toulon		66	79 900	5.270.000	3 708.700	70,0
		30	1073	73.001	78.330.495	37 204.167	47,4
Lyon	Nîmes à la Levade		64	81.400	5.210.500	2.202.900	42,0
Ouest	Paris à Versailles		18	86.311	1.553.607	1.236 507	79,5
Nord	Lignes des houillères du Pas-de-Calais.		86	89.930	7.734.000	3 790.000	49,0
Midi	Bordeaux à Toulouse		258	92.201	23.787.766	9.310.597	39,1
Est	Paris à Avricourt		410	100.905	41.371.041	21.272.457	51,4
—	Paris à Vincennes et à Brie-Comte-Robert.		37	102.197	3 781.797	2.610.623	69,0
		31	873	95.576	83.438.711	40.423.084	48,4
Lyon	Roanne à Lyon, par Saint-Etienne	32	146	113.200	16.534.500	7.452.100	45,0
Nord	Paris à Mouscron, etc.		556	121.021	67.288.000	34.326.000	50,8
Midi	Toulouse à Cette		223	123.416	27.521.668	10.772 057	39,1
Lyon	Tarascon à Cette		107	123.900	13 260.400	7.303.800	55,0
P.-O.	Paris à Bordeaux		587	124.164	72.882 510	25.692.979	35,2
		33	1473	122.846	180.952.578	78.094 836	43,3
Nord	Creil à Erquelmes et à Feignies	34	199	143.226	28.502.000	11.757.000	41,2
Ouest	Colombe à Rouen et embranchements sur Louviers; Rouen au Havre	35	228	155.304	35.409 463	14.376.693	40,6
Lyon	Lyon à Marseille		362	172.900	62.431 800	20.158.000	32,1
—	Paris à Lyon.		512	177.000	90.632.000	37.602.600	41,0
Ouest	Banlieue (sauf Paris à Versailles)		52	201.776	10.492.368	5.863.995	55,9
		36	926	176.626	163.556.168	63.624.595	38,9

TABLE DES MATIÈRES.

N° 46

NOTE

SUR LA MESURE DES VITESSES

A L'AIDE DU TUBE JAUGEUR

Par M. H. BAZIN,
Inspecteur général des ponts et chaussées.

En publiant dans nos *Recherches hydrauliques* les observations faites avec le tube jaugeur pour la détermination des vitesses dans les canaux découverts, nous n'avons donné pour la vitesse en chaque point qu'une valeur unique résultant de la moyenne de plusieurs constatations successives. Ainsi condensées, ces observations ne comprennent cependant pas moins de quarante pages de tableaux numériques, et l'impression de tous les éléments aurait occupé un espace quatre ou cinq fois plus considérable. L'absence de ces données primitives a quelquefois été signalée comme une lacune regrettable, surtout depuis que l'attention des hydrauliciens s'est portée sur les variations brusques de vitesse qui se produisent sans cesse à l'intérieur d'une masse fluide en mouvement.

Le tube jaugeur de M. Darcy est particulièrement propre à manifester la variation incessante des vitesses; les deux colonnes liquides, dont la différence de niveau sert à les déterminer, sont, en effet, dans un état d'oscil-

lation continuel et l'amplitude de ces oscillations est un indice de l'agitation tourbillonnaire. Mais, en étudiant la répartition des vitesses dans les courants, nous n'avions en vue que la détermination des vitesses moyennes locales, c'est-à-dire de la moyenne des vitesses qui se succèdent en un même point pendant une certaine période de temps, et dans cet ordre d'idées les oscillations du tube jaugeur ne constituaient qu'un inconvénient dont on a cherché à éliminer l'influence en multipliant et coordonnant convenablement les observations. Les moyennes seules ont été admises dans les calculs et reproduites dans le compte rendu des expériences; toutefois les carnets ayant tous été conservés, il était aisé d'y recourir et de rechercher si les variations accusées par le tube pouvaient jeter quelque lumière sur la propagation des mouvements tourbillonnaires à travers la masse fluide.

On sait qu'en désignant par H la différence de niveau des deux colonnes liquides du tube jaugeur, la vitesse correspondante est donnée par l'expression $v = \mu\sqrt{2g\text{H}}$, μ étant un coefficient de tarage qui, pour l'instrument dont nous avons fait usage, était sensiblement égal à l'unité; en répétant plusieurs fois l'opération, on obtient une série de hauteurs h', h'',... et l'on en déduit une série de vitesses v', v'',... dont la moyenne est prise pour la vitesse au point considéré. Il convient cependant de ne pas prendre au hasard les hauteurs h', h''...; si l'on observe les mouvements des deux colonnes, on voit qu'ils sont accidentés de temps en temps par des dénivellations plus fortes, qu'il vaut mieux laisser de côté lorsqu'on se propose uniquement d'obtenir une moyenne. Les observations que nous allons rapporter ont généralement été faites au moyen de quatre lectures comprenant deux maxima et deux minima d'amplitude ordinaire et l'on a déduit la vitesse v de la moyenne H des quatre hauteurs correspondantes. Supposons maintenant que h' soit la

plus grande et h'' la plus petite de ces quatre quantités. Les carnets d'opération font connaître immédiatement la différence $h'-h''$ que nous désignerons par δh; mais il sera préférable, pour la comparaison des résultats, de substituer à l'écart absolu δh, la valeur du rapport $\frac{1}{2}\frac{\delta h}{\mathrm{H}}$, qui mesure l'écart relatif entre les valeurs extrêmes de h et leur moyenne H. Si l'on remarque que $\mathrm{H}=\frac{v^2}{2g}$, le rapport ci-dessus peut aussi s'écrire sous la forme $\frac{g\delta h}{v^2}$. Nous aurons également à considérer les produits des rapports $\frac{1}{2}\frac{\delta h}{\mathrm{H}}$ par les vitesses correspondantes v; ces produits reviennent par suite à $\frac{g\delta h}{v}$.

Les données que nous avons à discuter sont nombreuses; elles comprennent 105 expériences exécutées sur toute l'étendue de la section transversale d'un courant. Nous nous trouvons ainsi en présence d'une masse considérable de faits dont la constatation n'a pas été coordonnée de manière à mettre en relief l'élément qu'il s'agit de dégager aujourd'hui; on peut donc se demander si un examen attentif des observations pourra révéler, au moins d'une manière générale, comment l'agitation tourbillonnaire se distribue dans toute l'étendue de la section d'un courant.

Les variations de la vitesse sont accusées par la dénivellation des deux colonnes de l'instrument; mais ces colonnes ne communiquant avec l'eau du courant que par un orifice d'un très petit diamètre, leurs oscillations en sont fort réduites et ne correspondent que de loin aux changements de la vitesse. On conçoit même que dans un courant à petite section certains mouvements trop rapides n'aient pas le temps de se transmettre efficace-

ment aux colonnes du tube, tandis que, dans un fleuve, des mouvements tourbillonnaires analogues se développant avec plus d'amplitude, ne passeraient pas inaperçus. Cette objection, fondée à un point de vue général, n'a que peu d'importance pour la discussion de nos expériences, les canaux sur lesquels on opérait ayant des dimensions parfaitement comparables.

Reste à examiner un côté plus délicat de la question; l'observateur, qui ne se proposait point de rechercher l'amplitude des écarts extrêmes, mais de déterminer promptement une moyenne aussi approchée que possible, pouvait se tenir plus ou moins en deçà de ces écarts, et sous ce rapport nos expériences doivent se classer en deux catégories distinctes : la plus importante des deux comprend celles où les vitesses ont été déterminées régulièrement par quatre lectures au moins, embrassant deux maxima et deux minima ordinaires; l'autre comprend les expériences faites au début, où l'on s'est borné à trois lectures, en choisissant autant que possible un niveau moyen et éliminant ainsi en partie l'influence des écarts. Ce procédé a été abandonné dès la fin de l'année 1857 (*). Les vitesses ainsi mesurées ne le cèdent peut-être pas aux autres en exactitude, mais elles sont beaucoup moins propres à nous éclairer sur l'agitation tourbillonnaire; aussi discuterons-nous d'abord celles qui comprennent régulièrement quatre lectures. Le tableau ci-dessous indique la répartition de toutes les expériences entre les deux catégories; elles y sont classées par ordre chro-

(*) Le nombre des lectures a quelquefois été réduit à trois en 1858 et 1859 dans des cas exceptionnels, lorsqu'il fallait abréger la durée d'une opération, soit pour diminuer la dépense d'eau, soit pour terminer l'expérience avant la nuit; mais, tout en réduisant le nombre des lectures, on n'a pas cherché, comme on le faisait dans la période antérieure, à éliminer l'influence des oscillations, de sorte que les résultats restent comparables à ceux des autres expériences à quatre lectures.

DÉSIGNATION DES SÉRIES D'EXPÉRIENCES	DATES des expériences	expériences à 4 lect.	expériences à 3 lect.	mesurées à 4 lect.	mesurées à 3 lect.	OBSERVATIONS
1er groupe. — *Expériences à 3 lectures.* [Août, septembre, octobre 1856. — Juin, juillet 1857. — Mars 1858. (1)]						
Canaux rectang. revêtus de ciment, de gravier, etc., sér. nos 55 à 57.	Sept., oct. 1856.	»	3	»	96	Les séries nos 53 et 67 doivent être classées dans le 1er groupe, bien que faites à 4 lectures ; on verra plus loin le motif de cette dérogation apparente.
Canal en planches à fond horizontal . . . . — 86 à 88.	Août, sept. 1856.	»	15	»	473	
Canaux trapézoïdaux et triangulaires. . . . . — 69 et 70.	Juin, juillet 1857.	»	12	»	464	
Petit canal rectangulaire en planches. . . . . — 53 et 67.	Mars 1858.	4	»	144	»	
		4	30	144	1.033	
2e groupe. — *Expériences exécutées partie à 3 lectures, partie à 4 lectures.* [Septembre, octobre, novembre 1857. — Mars 1858. (1)]						
Can. demi-circ. en ciment, revêt. de gravier, etc., sér. nos 71, 72 et 74.	Sept., oct., nov. 1857.	11	6	664	252	Les expériences sur les canaux demi-circulaires présentent un certain mélange des deux procédés ; la division indiquée ci-contre entre les mesures à 3 et 4 lect. n'est qu'approximative.
Canal demi-circulaire en planches. . . . . — 73. . .	Mars 1858.	3	1	157	66	
		14	7	821	318	
3e groupe. — *Expériences à 4 lectures.* (Avril, mai, décembre 1858. — Janvier, février, avril, mai, août 1859.)						
Canaux rectangulaires de 2m de larg. en planches . . . . sér. nos 58 à 60.	Avril, mai 1858.	10	»	403	»	Nous avons maintenu dans le 3e groupe les 2 expériences de la série n° 64, bien que l'on ait réduit à 3 le nombre des lectures en raison de la longueur exceptionnelle des opérations.
— — revêt. de liteaux espacés de 0m,01. — 61 à 63.	Janv., fév., mai 1859.	11	»	455	»	
— — revêt. de liteaux espacés de 0m,05. — 64 à 66.	Mai, déc. 1858.	6	2	249	180	
Petit canal rectangulaire en planches. . . . . — 54. . . .	Avril 1859.	1	»	27	»	
Canal trapézoïdal en planches. . . . . — 68. . . .	Janvier 1859.	4	»	161	»	
Rigole murée du Tillot. . . . . — 75. . . .	Août 1859.	4	»	136	»	
Canaux revêt. de lit. esp. de 0m,05, régime non unif. — 84 et 85	Mai 1858.	6	»	168	»	
		42	2	1.599	180	
4e groupe. — *Expériences sur des tuyaux rectangulaires.* (Octobre, novembre 1857. — Mars, avril 1859.)						
Tuyau rectangulaire en bois. . . . . sér. n° 51. . .	Oct., nov. 1857.	3	»	135	»	
— — . . . . — 52. . .	Mars, avril 1859.	3	»	135	»	
		6	»	270	»	

(1) Les séries nos 67 et 74 portent par erreur dans les tableaux, p. 197 et 214 des *Recherches hydrauliques*, les dates de 1856 et 1858 ; les dates véritables, 1858 pour la série n° 67 et 1857 pour la série n° 74, sont celles des tableaux de l'appendice, p. 464 et 467.

nologique, sans tenir compte de la numérotation de séries adoptée plus tard, lors de la rédaction définitive de l'ouvrage. Quelques-unes d'entre elles ayant été exécutées dans un système mixte, c'est-à-dire partie à quatre lectures et partie à trois lectures, forment un groupe intermédiaire. Enfin les six expériences sur des tuyaux rectangulaires doivent être étudiées à part et constituent un dernier groupe complètement distinct.

Toutes ces expériences font, dans les *Recherches hydrauliques* (3e partie, chap. II et III et 4e partie, chap. II), l'objet de tableaux spéciaux (*) qui donnent pour chaque point la vitesse mesurée à l'aide du tube jaugeur, ou plutôt le rapport $\frac{v}{U}$ de cette vitesse à la vitesse moyenne U de toute la section.

La valeur de $\frac{1}{2}\frac{\delta h}{H}$ a été relevée sur les carnets d'observation; elle n'est évidemment pas susceptible d'une grande précision; aussi a-t-il paru suffisant de ne la calculer qu'à un demi-centième près.

(*) Pages 168, 170 et 178 pour les séries nos 51 à 54, 187 à 217 pour les séries nos 55 à 75, 275 à 281 pour les séries nos 84 à 88.

On remarque en parcourant ces tableaux que quelques valeurs de $\frac{v}{U}$ sont identiques jusqu'à la 3e décimale, et l'on pourrait croire au premier abord que l'opérateur s'est dispensé de mesurer les vitesses de quelques points placés dans les mêmes conditions, en admettant pour tous les valeurs de h mesurées pour l'un d'eux. S'il avait opéré ainsi, les valeurs de $\frac{1}{2}\frac{\delta h}{H}$ seraient également identiques, ce qui n'a pas lieu. Les hauteurs h ont réellement été constatées au tube jaugeur pour tous les points, mais dans le calcul des vitesses correspondantes $\mu\sqrt{2gH}$, on n'a pas tenu compte pour H des fractions de millimètre; deux valeurs de H différant de près de 1 millimètre, par exemple $H = 0{,}1047$ et $H = 0{,}1054$, conduisent ainsi à une même valeur de v correspondant à $H = 0{,}105$. C'est ce qui explique la reproduction de certaines valeurs de $\frac{v}{U}$ dans les tableaux des vitesses.

La discussion de toutes ces données est assez délicate; nous commencerons par les expériences à quatre lectures (3ᵉ groupe); nous passerons ensuite aux expériences à trois lectures du 1ᵉʳ groupe dont les résultats ne présentent pas autant de netteté. Quant aux canaux demi-circulaires et aux tuyaux rectangulaires (2ᵉ et 4ᵉ groupes), ils nécessitent une discussion spéciale.

EXPÉRIENCES A QUATRE LECTURES (1858-1859).

Canaux rectangulaires de 2 mètres de largeur. — Séries nᵒˢ 58 à 66.
Canaux divers. — Séries nᵒˢ 54, 68, 75, 84 et 85.

Les neuf séries nᵒˢ 58 à 66 sont les plus comparables de toutes; elles ont, en effet, été exécutées sur des canaux rectangulaires de même largeur, dans lesquels on a fait varier la pente et l'état des parois, de manière à pouvoir comparer, pour une même paroi, les résultats obtenus sur trois pentes différentes et réciproquement, sur une même pente, les résultats fournis par trois modifications successives de la paroi; les neuf séries se correspondent par suite, ainsi que l'indique le tableau ci-après :

NATURE DES PAROIS.		PENTE de 0,0015	de 0,0059	de 0,0089
Parois en planches		Série nº 58	Série nº 59	Série nº 60
Parois en planches recouvertes de liteaux	espacés de $0^m,01$.	— 61	— 62	— 63
	— de $0^m,05$.	— 64	— 65	— 66

Les points choisis pour la mesure des vitesses sont répartis de la même manière dans toutes les sections, et les observations ont été faites régulièrement au moyen de quatre lectures, sauf celles de la série nº 64, où, pour réduire la durée de l'opération et la dépense d'eau, on

s'est borné à trois lectures (*) ; mais on ne cherchait plus, ainsi qu'on l'avait fait pour les expériences antérieures, à restreindre l'amplitude des écarts observés qui paraissent tout à fait de même ordre que ceux des séries similaires n°s 65 à 66.

Les neuf séries n°s 58 à 66 se partagent en trois groupes nettement séparés suivant l'état des parois, ainsi que le montre la comparaison ci-après des vitesses moyennes U et des valeurs de $\frac{RI}{U^2}$ pour chacune des 29 expériences (**).

DÉSIGNATION DES SÉRIES réparties EN TROIS GROUPES	VITESSES MOYENNES U Débit par seconde :				VALEURS DU COEFFICIENT $\frac{RI}{U^2}$ Débit par seconde :			
	0^{mc},203	0^{mc},411	0^{mc},824	1^{mc},236	0^{mc},203	0^{mc},411	0^{mc},824	1^{mc},[illegible]
Parois unies en planches :	m.	m.	m.	m.				
Sér. n° 58. Pente de 0,0015.	0,730	0,953	1,248	1,429	0,000354	0,000302	0,000247	0,000[illegible]
— 59 — 0,0059.	1,207	1,573	2,051	2,318	0,000311	0,000266	0,000240	0,000[illegible]
— 60 — 0,0089.	»	»	2,297	2,571	»	»	0,000241	0,000[illegible]
Parois moins unies avec liteaux espacés de 0^m,01 :								
Sér. n° 61. Pente de 0,0015.	0,643	0,854	1,109	1,267	0,000459	0,000396	0,000352	0,000[illegible]
— 62 — 0,0059.	0,961	1,336	1,702	1,979	0,000526	0,000441	0,000392	0,000[illegible]
— 63 — 0,0089.	»	1,454	1,925	2,199	»	0,000483	0,000415	0,000[illegible]
Parois plus résistantes avec liteaux espacés de 0^m,05 :								
Sér. n° 64. Pente de 0,0015.	»	»	0,856	0,948	»	»	0,000668	0,000[illegible]
— 65 — 0,0059.	0,756	1,000	1,295	1,511	0,001138	0,000942	0,000824	0,000[illegible]
— 66 — 0,0089.	»	»	1,464	1,675	»	»	0 000896	0,000[illegible]

(*) L'expérience n° 2 de cette série ne comprenait pas moins de 105 points d'observation et exigeait un débit continu de 1.200 litres par seconde pendant près d'une journée. L'expérience n° 2 de la série n° 60 renferme aussi quelques observations à trois lectures; ce sont celles de la tranche du fond qui ont été ainsi abrégées pour terminer l'expérience avant la nuit.

(**) Suivant la notation employée dans les *Recherches hydrauliques*, nous désignerons par R le rayon moyen de la section transversale du canal, c'est-à-dire le quotient de l'aire de cette section par le périmètre mouillé; I est la pente par unité de longueur.

On va voir que les valeurs de δh sont différentes pour chacun de ces trois groupes. Afin de les comparer plus facilement, nous avons, pour chaque expérience, divisé la section en plusieurs régions comprenant autant que possible des vitesses peu différentes :

1° Région centrale, où se trouvent les plus grandes vitesses (5 à 10 points suivant les cas);

2° Périmètre, embrassant toutes les mesures de vitesses opérées le long des parois (à $0^m,03$ de distance); le nombre de ces vitesses varie de 15 à 21 par expérience (et même 25 pour la deuxième expérience de la série n° 64);

3° Une, deux ou trois régions intermédiaires, comprenant un nombre de points très variable, suivant la forme de la section et la distribution des vitesses.

Nous avons calculé pour chaque région la moyenne des valeurs de $\frac{v}{U}$, $\frac{g\delta h}{v^2}$ et $\frac{g\delta h}{v}$; ces moyennes sont réunies dans le tableau suivant. Les petits chiffres entre parenthèses accolés aux valeurs de $\frac{v}{U}$, désignent le nombre de points compris dans la région considérée.

NUMÉROS des séries	et des expériences	VALEURS MOYENNES DE $\frac{v}{U}$ Région des plus grandes vitesses	Régions intermédiaires n° 1	Régions intermédiaires n° 2	Régions intermédiaires n° 3	Périmètre	VALEURS MOYENNES DE $\frac{g\delta h}{v^2}$ Région des plus grandes vitesses	Régions intermédiaires n° 1	Régions intermédiaires n° 2	Régions intermédiaires n° 3	Périmètre	VALEURS MOYENNES DE $\frac{g\delta h}{v}$ Région des plus grandes vitesses	Régions intermédiaires n° 1	Régions intermédiaires n° 2	Régions intermédiaires n° 3	Périmètre
	1er groupe. — *Parois unies en planches.*															
Série n° 58	Expér. n° 1	1,189 (5)	1,025 (6)	»	»	0,864 (15)	0,076	0,114	«	»	0,163	0,067	0,085	»	»	0,103
	— 2	1,186 (7)	0,992 (15)	»	»	0,811 (17)	0,064	0,073	»	»	0,093	0,072	0,069	»	»	0,072
	— 3	1,184 (5)	1,009 (28)	»	»	0,778 (19)	0,050	0,080	»	»	0,138	0,074	0,101	»	»	0,134
	— 4	1,191 (10)	0,991 (34)	»	»	0,763 (21)	0,039	0,066	»	»	0,095	0,066	0,086	»	»	0,103
Série n° 59	Expér. n° 1	1,178 (7)	1,084 (4)	»	»	0,973 (15)	0,053	0,053	»	»	0,077	0,075	0,069	»	»	0,090
	— 2	1,194 (7)	1,068 (4)	»	»	0,934 (15)	0,024	0,026	»	»	0,053	0,045	0,044	»	»	0,079
	— 3	1,180 (7)	1,033 (15)	»	»	0,847 (17)	0,021	0,037	»	»	0,049	0,051	0,078	»	»	0,086
	— 4	1,226 (5)	1,043 (28)	»	»	0,833 (19)	0,027	0,025	»	»	0,034	0,076	0,060	»	»	0,066
Série n° 60	Expér. n° 1	1,172 (7)	1,138 (15)	»	»	0,883 (17)	0,022	0,029	»	»	0,049	0,059	0,076	»	»	0,099
	— 2	1,212 (8)	1,056 (17)	»	»	0,883 (17)	0,017	0,013	»	»	0,023	0,053	0,035	»	»	0,052
	2e groupe. — *Parois moins unies recouvertes de liteaux espacés de 0m,01.*															
Série n° 61	Expér. n° 1	1,207 (7)	1,051 (15)	»	»	0,900 (17)	0,122	0,146	»	»	0,201	0,095	0,098	»	»	0,116
	— 2	1,251 (5)	1,136 (9)	0,930 (8)	»	0,846 (17)	0,106	0,114	0,147	»	0,177	0,113	0,111	0,117	»	0,128
	— 3	1,268 (6)	1,157 (9)	0,981 (18)	»	0,802 (19)	0,053	0,079	0,098	»	0,158	0,074	0,101	0,107	»	0,141
	— 4	1,244 (9)	1,155 (11)	0,978 (24)	»	0,791 (21)	0,053	0,072	0,098	»	0,160	0,084	0,105	0,121	»	0,161
Série n° 62	Expér. n° 1	1,222 (7)	1,063 (4)	»	»	0,884 (15)	0,096	0,103	»	»	0,140	0,112	0,105	»	»	0,119
	— 2	1,213 (7)	1,014 (4)	»	»	0,887 (15)	0,061	0,046	»	»	0,123	0,099	0,063	»	»	0,145
	— 3	1,275 (5)	1,156 (9)	0,963 (8)	»	0,819 (17)	0,036	0,053	0,061	»	0,111	0,078	0,104	0,100	»	0,155
	— 4	1,240 (10)	1,084 (11)	0,923 (12)	»	0,824 (19)	0,034	0,050	0,055	»	0,074	0,083	0,107	0,100	»	0,121
Série n° 63	Expér. n° 1	1,247 (7)	1,032 (4)	»	»	0,923 (15)	0,051	0,043	»	»	0,099	0,093	0,061	»	»	0,132
	— 2	1,248 (5)	1,121 (9)	0,915 (8)	»	0,837 (17)	0,044	0,052	0,053	»	0,089	0,106	0,112	0,093	»	0,143
	— 3	1,254 (5)	1,158 (9)	0,966 (19)	»	0,786 (19)	0,033	0,042	0,066	»	0,111	0,091	0,107	0,139	»	0,191
	3e groupe. — *Parois recouvertes de liteaux espacés de 0m,05.*															
Série n° 64	Expér. n° 1	1,308 (9)	1,151 (11)	0,924 (24)	»	0,651 (21)	0,098	0,135	0,225	»	0,304	0,110	0,133	0,178	»	0,169
	— 2	1,284 (9)	1,213 (16)	1,058 (17)	0,877 (24)	0,620 (25)	0,082	0,103	0,155	0,221	0,358	0,100	0,118	0,155	0,184	0,211
Série n° 65	Expér. n° 1	1,248 (7)	1,030 (4)	»	»	0,826 (15)	0,111	(0,064)	»	»	0,225	0,105	(0,050)	»	»	0,141
	— 2	1,278 (7)	1,008 (13)	»	»	0,757 (17)	0,079	0,108	»	»	0,202	0,101	0,109	»	»	0,153
	— 3	1,321 (10)	1,102 (11)	0,855 (12)	»	0,704 (19)	0,069	0,092	0,150	»	0,199	0,101	0,131	0,166	»	0,181
	— 4	1,333 (6)	1,125 (19)	0,848 (16)	»	0,689 (21)	0,050	0,067	0,122	»	0,183	0,101	0,114	0,156	»	0,190
Série n° 66	Expér. n° 1	1,297 (8)	1,159 (9)	0,904 (8)	»	0,649 (17)	0,045	0,065	0,063	»	0,129	0,085	0,094	0,083	»	0,123
	— 2	1,309 (10)	1,129 (11)	[illegible]	»	[illegible]	[illegible]	0,049	0,069	—	[illegible]	0,079	[illegible]	0,104	»	[illegible]

Examinons d'abord comment se comporte le rapport $\frac{g\delta h}{v^2}$. On reconnaît aisément à l'inspection de ces chiffres :

1° Que, pour chaque expérience en particulier, les valeurs de $\frac{g\delta h}{v^2}$ vont en croissant depuis la région centrale, où se trouvent les plus grandes vitesses, jusqu'à la paroi ;

2° Que, si l'on compare entre elles les expériences d'une même série, les valeurs de $\frac{g\delta h}{v^2}$ correspondantes aux régions similaires vont en décroissant d'une expérience à la suivante à mesure que le débit et les vitesses absolues augmentent ;

3° Que, si l'on compare les expériences correspondantes (d'égal débit) des trois séries d'un même groupe (parois semblables), les valeurs de $\frac{g\delta h}{v^2}$ vont également en décroissant lorsque l'on passe d'une série à la suivante, c'est-à-dire lorsque la pente et les vitesses absolues augmentent ;

4° Qu'enfin, si l'on passe d'un groupe à l'autre, les valeurs de $\frac{g\delta h}{v^2}$ pour les expériences correspondantes (même débit et même pente) vont en croissant du premier groupe (parois en planches) au deuxième (parois recouvertes de liteaux espacés de $0^m,01$), et de même en passant du deuxième au troisième (parois recouvertes de liteaux espacés de $0^m,05$), c'est-à-dire qu'elles croissent avec la résistance à la paroi.

En résumé, pour un même état de la paroi, le rapport $\frac{g\delta h}{v^2}$ diminue constamment lorsque les vitesses augmentent, et, toutes choses égales d'ailleurs, varie dans le même sens que la résistance à la paroi.

Passons maintenant au rapport $\frac{g\delta h}{v}$; ses valeurs vont encore comme celles de $\frac{g\delta h}{v^2}$, en croissant du centre au périmètre, mais elles ne semblent pas varier, comme ces dernières, lorsqu'on compare les régions correspondantes de deux expériences d'un même groupe. Si l'on passe ensuite d'un groupe à l'autre, elles croissent avec la résistance à la paroi. Condensons en effet le tableau précédent en faisant les moyennes de $\frac{v}{U}$ et $\frac{g\delta h}{v}$ pour chaque région.

DÉSIGNATION DES SÉRIES	RÉGION des plus grandes vitesses		RÉGIONS INTERMÉDIAIRES n° 1		RÉGIONS INTERMÉDIAIRES n° 2		RÉGIONS INTERMÉDIAIRES n° 3		PÉRIMÈTRE	
	$\frac{V}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$
1er groupe. — *Parois unies en planches.*										
Série n° 58. 4 expér. .	1,187	0,070	1,004	0,085	»	»	»	»	0,804	0,103
— 59 4 — . .	1,195	0,062	1,057	0,063	»	»	»	»	0,897	0,080
— 60 1 — (1).	1,172	0,059	1,038	0,076	»	»	»	»	0,883	0,099
Moy. des 9 expér.	1,189	0,065	1,031	0,074	»	»	»	»	0,854	0,092
2e groupe. — *Parois moins unies recouvertes de liteaux espacés de 0m,01.*										
Série n° 61. 4 expér. .	1,242	0,092	1 125	0,104	0,963	0.115	»	»	0,835	0,137
— 62 4 — . .	1,238	0,093	1.079	0,095	0,943	0,100	»	»	0,853	0,135
— 63 3 — . .	1,250	0,097	1,104	0,094	0,940	0,116	»	»	0,849	0,155
Moy. des 11 expér.	1,243	0,094	1,103	0,098	0,949	0,110	»	»	0,845	0,141
3e groupe. — *Parois recouvertes de liteaux espacés de 0m,05.*										
Sér. n° 64. Expér. n° 1	1,308	0,110	1,151	0,133	»	»	0,924	0,178	0,651	0,169
— 64 — 2	1,284	0,100	1,213	0,118	1,058	0,155	0,877	0,184	0,620	0,211
— 65 4 expér. .	1,295	0,102	»	»	1,078	0,118 (2)	0.852	0,161	0,744	0,166
— 66 2 — . .	1,303	0,082	1,144	0.093	»	»	0,901	0,094	0,654	0,135
Moy. des 8 expér.	1,297	0,098	1,163	0,109	1,071	0,125	0,876	0,149	0,694	0,164

(1) Nous avons exclu l'expérience n° 2 de la série n° 60 qui paraît renfermer des anomalies; les mesures de vitesse de la tranche du fond n'ont d'ailleurs été faites qu'à l'aide de trois lectures au lieu de quatre, et peut-être avec quelque précipitation. (Voir la note ci-dessus.)

(2) En excluant la valeur 0,050 de l'expérience n° 1 qui est certainement erronée.

Dans la région des plus grandes vitesses, la valeur de $\frac{g\delta h}{v}$, que nous désignerons par Δ, est à peu près la même pour les trois séries de chaque groupe et varie d'un groupe à l'autre proportionnellement à la différence $\frac{V}{U}-1$, $\frac{V}{U}$ étant le rapport des vitesses moyenne et maximum ; car si l'on calcule pour chaque série la valeur du rapport $\frac{\Delta}{\frac{V}{U}-1}=M$, on obtient des chiffres assez constants :

DÉSIGNATION DES GROUPES ET DES SÉRIES		Δ	$\frac{V}{U}-1$	M	NOMBRE d'expériences
1er groupe.	Série n° 58. .	0,070	0,187	0,374	4 expériences.
	— 59. .	0,062	0,195	0,318	4 —
	— 60. .	0,059	0,172	0,343	1 —
2e groupe.	Série n° 61. .	0,092	0,242	0,380	4 expériences.
	— 62. .	0,093	0,238	0,391	4 —
	— 63. .	0,097	0,250	0,388	3 —
3e groupe.	Série n° 64. .	0,105	0,296	0,355	2 expériences.
	— 65. .	0,102	0,295	0,346	4 —
	— 66. .	0,082	0,303	0,271	2 —
	Moyenne générale.			0,357	28 expériences.

Nous pouvons donc poser

$$\Delta = 0,36\left(\frac{V}{U}-1\right).$$

Quant aux valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$ pour les autres régions, on voit bien qu'elles vont en croissant à mesure que l'on s'approche des parois, c'est-à-dire qu'elles augmentent avec la différence $\frac{V}{U}-\frac{v}{U}$; il reste à déterminer la mesure de cet accroissement. Mais nous allons préalablement réunir aux résultats ci-dessus, ceux des cinq autres

séries d'expériences à quatre lectures que nous avons d'abord laissées de côté, savoir :

Série n° 54 (Petit canal rectangulaire en planches);
— n° 68 (Canal trapézoïdal en planches);
— n° 75 (Rigole murée du Tillot);
Séries n°s 84 et 85 (Canal revêtu de liteaux espacés de 0m,05).

Les données fondamentales (pentes, vitesses et résistance des parois) sont résumées dans le tableau suivant :

DÉSIGNATION DES SÉRIES.		VITESSES MOYENNES				VALEURS DU COEFFICIENT $\frac{RI}{U^2}$			
		Expériences				Expériences			
		n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4
Série n° 54	Petit canal rectangulaire en planches. (Pente de 0,006.)	m. 1,281	»	»	»	0,000339	»	»	»
Série n° 68	Canal trapézoïdal en planches. (Pente de 0,0015.).	0,908	1,118	1,329	1,497	0,000279	0,000253	0,000232	0,00022[illegible]
Série n° 75	Rigole murée du Tillot. — Paroi de moellons piqués pouvant être assimilée à la paroi de taille. (Pente de 0,0081.).	1,824	2,352	2,560	2,707	0,000329	0,000268	0,000270	0,00026[illegible]
Série n° 84	Parois recouvertes de liteaux espacés de 0m,05. (Pente de 0,0015, terminée par une chute. — Régime non uniforme.).	0,880	1,033	1,246	»	0,000675	0,000710	0,000760	»
Série n° 85	id. id.	1,011	1,218	1,473	»	0,000665	0,000670	0,000705	»

Les résultats de ces quinze expériences étant tout à fait analogues à ceux des séries discutées plus haut, il nous suffira d'indiquer ci-dessous les valeurs de $\frac{v}{U}$ et de $\frac{g\delta h}{v}$.

DÉSIGNATION DES SÉRIES		VALEURS MOYENNES de $\frac{v}{U}$			VALEURS MOYENNES de $\frac{g \delta h}{v}$		
		Région des plus grandes vitesses	Région intermédiaire	Périmètre	Région des plus grandes vitesses	Région intermédiaire	Périmètre
Série n° 54	Expér. n° 1	1,193 (3)	1,111 (7)	0,811 (17)	0,053	0.077	0,119
Série n° 68	Expér. n° 1	1,183 (5)	1,036 (9)	0,883 (13)	0,072	0,069	0,089
	— 2	1,160 (5)	1,038 (9)	0,839 (11)	0,091	0,087	0,111
	— 3	1,176 (10)	1,022 (24)	0,795 (15)	0,091	0,105	0,145
	— 4	1,181 (15)	1,007 (28)	0,921 (17)	0,069	0,110	0,145
Moyennes de la série.		1,175	1,026	0,860	0,081	0,093	0,123
Série n° 75	Expér. n° 1	1,201 (3)	1,046 (11)	0,849 (15)	0,081	0,092	0,098
	— 2	1,206 (3)	1,043 (11)	0,810 (13)	0,043	0,079	0,090
	— 3	1,190 (6)	1,010 (15)	0,786 (19)	0,058	0,080	0,111
	— 4	1,179 (6)	1,015 (15)	0,794 (19)	0,064	0.080	0,103
Moyennes de la série.		1.194	1,028	0,810	0,062	0,085	0,101
Série n° 84	Expér. n° 1	1,251 (6)	1,158 (9)	0,868 (13)	0,123	0,163	0,194
	— 2	1,308 (6)	1,108 (9)	0,735 (13)	0,104	0,158	0,214
	— 3	1,313 (6)	1,134 (9)	0,779 (13)	0,047	0,083	0,115
Moyennes de la série.		1,291	1.133	0,794	0,091	0,135	0,174
Série n° 85	Expér. n° 1	1,226 (6)	1,152 (9)	0,796 (13)	0,116	0,130	0,193
	— 2	1,276 (6)	1,115 (9)	0,778 (13)	0,106	0,175	0,239
	— 3	1,295 (6)	1,124 (9)	0,779 (13)	0.050	0,088	0,113
Moyennes de la série.		1,266	1,130	0,784	0,091	0,131	0,182

Si l'on calcule pour chaque série le rapport M, on retrouve en moyenne M = 0,36, c'est-à-dire précisément la valeur fournie par les neuf séries n°s 58 à 66 :

DÉSIGNATION DES SÉRIES	Δ	$\frac{V}{U} - 1$	M	NOMBRE des expériences
Série n° 54.	0,053	0,193	0,275	1 expérience.
— 68.	0,081	0,175	0,463	4 —
— 75.	0,062	0,194	0,319	4 —
— 84.	0,091	0,291	0,313	3 —
— 85.	0,091	0,266	0,342	3 —
Moyenne générale.			0,357	15 expériences.

Revenons maintenant, en réunissant tous les éléments renfermés dans les tableaux précédents, à l'étude des

variations de $\frac{g\delta h}{v}$, et calculons pour toutes les expériences les valeurs correspondantes des différences $\frac{g\delta h}{v}-\Delta$ et $\frac{V}{U}-\frac{v}{U}$; nous obtenons ainsi 106 couples de valeurs que nous classerons, suivant l'ordre croissant de $\frac{V-v}{U}$, ainsi qu'il suit :

DÉSIGNATION DES EXPÉRIENCES	$\frac{V-v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}-\Delta$
1er groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ inférieur à 0,15$\left.\right)$.		
Sér. n° 64. 1 valeur.	0,071	0,018
— 54 1 —	0,082	0,024
— 61 4 —	0,117	0,012
— 60 1 —	0,134	0,017
— 85 3 —	0,136	0,040
— 59 4 —	0,138	0,001
— 63 3 —	0,146	—0,003
— 68 4 —	0,149	0,012
Moy. des 21 valeurs du 1er groupe. . .	0,131	0,0129
2e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,15 et 0,23$\left.\right)$.		
Sér. n° 64. 1 valeur.	0,157	0,023
— 84 3 —	0,158	0,044
— 62 4 —	0,159	0,002
— 66 2 —	0,159	0,011
— 75 4 —	0,166	0,023
— 58 4 —	0,183	0,015
— 65 4 —	0,217	0,016
— 64 1 —	0,226	0,055
Moy. des 23 valeurs du 2e groupe. . .	0,177	0,0198
3e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,28 et 0,32$\left.\right)$.		
Sér. n° 61. 4 valeurs	0,279	0,023
— 60 1 —	0,289	0,040
— 62 4 —	0,295	0,007
— 59 4 —	0,298	0,018
— 63 3 —	0,310	0,019
— 68 4 —	0,315	0,042
Moy. des 20 valeurs du 3e groupe. . .	0,298	0,0229
4e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,38 et 0,385$\left.\right)$.		
Sér. n° 54. 1 valeur.	0,382	0,066
— 58 4 —	0,383	0,033
— 64 1 —	0,384	0,068
— 75 4 —	0,384	0,039
— 62 4 —	0,385	0,042
Moy. des 14 valeurs du 4e groupe. . .	0,384	0,0421
5e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,40 et 0,41$\left.\right)$.		
Sér. n° 63. 3 valeurs	0,401	0,058
— 66 2 —	0,402	0,012
— 64 1 —	0,406	0,084
— 61 4 —	0,407	0,045
Moy. des 10 valeurs du 5e groupe. . .	0,404	0,0462
6e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,44 et 0,55$\left.\right)$.		
Sér. n° 65. 4 valeurs	0,443	0,059
— 85 3 —	0,482	0,091
— 84 3 —	0,497	0,083
— 65 4 —	0,551	0,064
Moy des 14 valeurs du 6e groupe. . .	0,494	0,0724
7e groupe $\left(\frac{V-v}{U}\right.$ compris entre 0,65 et 0,665$\left.\right)$.		
Sér. n° 66. 2 valeurs	0,649	0,053
— 64 1 —	0,657	0,059
— 64 1 —	0,663	0,111
Moy. des 4 valeurs du 7e groupe. . .	0,655	0,0690

Si l'on résume le tableau précédent, en rapprochant les moyennes des sept groupes, et désignant par N le rapport des deux différences $\frac{g\delta h}{v} - \Delta$ et $\frac{V-v}{U}$, il vient :

DÉSIGNATION DES GROUPES	$\frac{V-v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v} - \Delta$	N
Groupe n° 1. 21 valeurs.	0,131	0,0129	0,098
— 2 23 —	0,177	0,0198	0,112
— 3 20 —	0,298	0,0229	0,077
— 4 14 —	0,384	0,0421	0,110
— 5 10 —	0,404	0,0462	0,114
— 6 14 —	0,494	0,0721	0,147
— 7 4 —	0,655	0,0690	0,105
Moyenne générale.			0,107

Malgré quelques anomalies, on voit que le rapport N ne diffère pas beaucoup de 0,11, de telle sorte que l'on a :

$$\frac{g\delta h}{v} - \Delta = 0,11 \frac{V-v}{U},$$

et en remplaçant Δ par sa valeur trouvée plus haut,

$$\frac{g\delta h}{v} = 0,36\left(\frac{V}{U} - 1\right) + 0,11 \frac{V-v}{U}.$$

EXPÉRIENCES A TROIS LECTURES (1856-1857).

Canaux divers. — Séries n°s 53, 55 à 57, 67, 69, 70, 86 à 88.
Petit canal rectangulaire en planches. — Séries n°s 53 et 67.

Passons maintenant aux expériences à trois lectures de 1856-57 qui constituent le 1er groupe; nous y joindrons les séries n°s 53 et 67. Bien qu'elles aient été exécutées à quatre lectures, au commencement de 1858, ces deux petites séries présentent le même caractère et il est clair à l'inspection des carnets, que l'observateur

tout en faisant quatre lectures, opérait encore dans le même esprit qu'en 1857, évitant d'inscrire les écarts un peu notables (*). Nous avons ainsi en tout 34 expériences, que nous partagerons en deux catégories distinctes :

1° Séries nos 53 et 67 (Petit canal rectangulaire en planches)	4 expér.
— nos 69 et 70 (Canaux trapézoïdaux et triangulaires en planches).	12 —
— nos 55, 56 et 57 (Canaux en ciment, revêtus de gravier)	3 —
	19 expér.
2° Séries nos 86, 87 et 88 (Canal en planches à fond horizontal)	15 —
Total.	34 expér.

Les résultats sont ici moins nets que ceux des séries à quatre lectures. Deux causes contribuent en effet à diminuer les valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$. L'observateur, en faisant abstraction des maxima et minima un peu saillants, a naturellement restreint l'amplitude des écarts ; d'un autre côté, toutes ces expériences (moins deux) ont eu lieu sur des canaux à surface unie dans lesquelles les variations de la vitesse étaient moins importantes, ce qui tend encore à diminuer $\frac{g\delta h}{v}$ ainsi que nous l'avons constaté précédemment.

Examinons d'abord les dix-neuf expériences de la première catégorie. Les variations de vitesse n'étant pas très considérables, nous ne tiendrons compte que de la région des plus grandes vitesses et de la région périmétrique ; les deux tableaux suivants font connaitre les valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$, M et N.

(*) La série n° 67 présente des anomalies, bien que plusieurs expériences aient été recommencées en déplaçant le point d'opération ; l'expérience unique qui constitue la série n° 53 a été exécutée dans le même canal ; une observation consignée sur les carnets indique que le talon de l'instrument touchait la paroi de droite, ce qui a pu introduire quelques erreurs.

DÉSIGNATION DES SÉRIES.	VALEURS de $\frac{v}{U}$		VALEURS de $\frac{g \delta h}{v}$	
	Région des plus grandes vitesses	Périmètre	Région des plus grandes vitesses	Périmètre
Canal trapézoïdal en planches. Série n° 69. Expér. n° 1. . .	1,250 (5)	1,030 (12)	0.025	0,030
— 2. . .	1,230 (5)	0,949 (14)	0,015	0,032
— 3. . .	1.228 (5)	0,923 (17)	0,020	0,030
— 4. . .	1,220 (6)	0,879 (18)	0,022	0.030
— 5. . .	1,208 (6)	0,850 (20)	0,018	0,033
— 6. . .	1,228 (6)	0,908 (20)	0,022	0,036
Moyennes de la série.	1,227	0.923	0,020	0,031
Canal triangulaire en planches. Série n° 70 (1). Expér. n° 1. . .	1,248 (2)	0,907 (6)	0,009	0,035
— 2. . .	1,235 (2)	0,893 (8)	0,021	0,044
— 3. . .	1,230 (5)	0,806 (10)	0.028	0,040
— 4. . .	1.211 (5)	0,949 (10)	0,033	0,046
— 5. . .	1,210 (5)	0,845 (12)	0.019	0,033
— 6. . .	1,208 (5)	0,649 (13)	0,028	0,046
Moyennes de la série.	1,224	0,841	0,023	0,041
Canal rectang. en planches de 0m,80 de larg. Sér. n° 53 Expér. unique.	1,204 (3)	0,825 (15)	0,032	0,047
— 67 — n° 1. . .	1,264 (5)	0,929 (13)	0,026	0,036
— 2. . .	1,209 (6)	0.763 (15)	0,032	0,038
— 3. . .	1,189 (6)	0,821 (17)	0,024	0,034
Moyennes des deux séries. . .	1,216	0,834	0 028	0,038
Canal très uni en ciment. Série n° 55. . .	1,204 (3)	0,940 (13)	0.025	0,037
Canal en ciment revêtu de petit gravier. . . . . . . — 56. . .	1,270 (6)	0,817 (14)	0,038	0,090
Canal en ciment revêtu de gros gravier. . . . . . . — 57. . .	1,311 (6)	0,757 (15)	0,042	0.081

(1) On n'a pas compris dans le périmètre le point situé sur l'axe à la partie inférieure du triangle.

DÉSIGNATION DES SÉRIES	RÉGION des plus grandes vitesses			PÉRIMÈTRE		
	Δ	$\frac{V}{U} - 1$	M	$\frac{g \delta h}{v} - \Delta$	$\frac{V - v}{U}$	N
Sér. n° 69. . . . 6 expér.	0,020	0,227	0,088	0,011	0,304	0,036
— 70. . . . 6 —	0,023	0,224	0,103	0,018	0,383	0,047
— 53 et 67. 4 —	0,028	0,216	0,130	0,010	0,382	0,026
— 55. . . . 1 —	0,025	0,204	0,123	0,012	0,264	0,045
— 56. . . . 1 —	0,038	0,270	0,141	0,052	0,453	0,115
— 57. . . . 1 —	0,042	0,311	0,135	0,039	0,551	0,070
Moyennes générales.			0,109	. . . .		0,044

Nous avons cette fois M = 0,11, N = 0,04 ; ces valeurs sont inférieures à celles que nous avions déduites des expériences à quatre lectures, mais elles ont varié presque dans le même rapport, N restant toujours à peu près égal au tiers de M. La simplification des procédés de mesure n'a eu d'autre effet que de réduire la valeur numérique des deux coefficients M et N, qui n'avait évidemment rien d'absolu.

Quant aux séries n°s 86, 87 et 88 (canal à fond horizontal) exécutées en 1856 d'une manière un peu sommaire, elles renferment beaucoup d'anomalies et ne fournissent aucun résultat concluant. Les vitesses y sont faibles, ce qui augmente l'importance relative des erreurs d'observation ; d'autre part, les points choisis pour la mesure des vitesses sont en petit nombre et plus espacés que dans les autres séries. La région centrale se réduit en réalité à un seul point, ce qui ne permet pas de déterminer Δ avec précision. Si l'on calcule $\frac{g\delta h}{v}$ pour la zone périmétrique, on obtient en moyenne $\frac{g\delta h}{v} = 0{,}055$, valeur supérieure à celle du tableau précédent, mais inférieure aux valeurs fournies par les grandes expériences de 1858 sur les canaux rectangulaires en planches (séries n°s 58 à 66).

Les séries n°s 86 à 88 ne peuvent donc fournir aucune donnée utile et nous ne nous y arrêterons pas davantage.

EXPÉRIENCES SUR LES CANAUX DEMI-CIRCULAIRES.

Séries n°s 71 à 74. — (1857-1858).

Les expériences sur les canaux demi-circulaires ont été exécutées, tantôt à trois, tantôt à quatre lectures, ainsi que l'indique le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION DES SÉRIES		MODE D'OBSERVATION POUR CHAQUE EXPÉRIENCE					
		Expér. n° 1	Expér. n° 2	Expér. n° 3	Expér. n° 4	Expér. n° 5	Expér. nos 6 et 7
Série n° 71	Canal en ciment.	4 lect.	4 lect.	4 lectures.	4 lectures.	4 lectures.	4 lect. (1)
Série n° 72	Canal en ciment mélangé de sable.	3 lect.	3 lect.	3 et 4 lect. (1/3 environ à 4 lect.).	3 et 4 lect. (1/3 environ à 4 lect.).	3 et 4 lect. (2/3 environ à 4 lect.).	»
Série n° 73	Canal en planches.	4 lect.	4 lect.	3 et 4 lect. (1/4 environ à 4 lect.).	3 et 4 lect. (4/5 environ à 4 lect.).	»	»
Série n° 74	Canal revêtu de gravier.	3 lect.	3 lect.	4 lectures.	4 lectures.	»	»

(1) Nous excluons l'expérience n° 8, les vitesses mesurées aux environs de la surface présentant des anomalies; une partie de cette expérience (1/3 environ) a été faite à trois lectures.

La dernière expérience de chacune de ces quatre séries a été combinée de telle sorte que le niveau de l'eau atteignît exactement le diamètre du cercle, et les points choisis pour la mesure des vitesses ont été régulièrement espacés sur des cercles concentriques. Ces expériences, que nous allons d'abord discuter en particulier, sont comparables, les observations avec le tube jaugeur ayant été faites en très grande partie à quatre lectures. Le tableau ci-après fait connaître pour chacun des cercles concentriques la moyenne des rapports $\frac{v}{U}$ et des valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$.

SÉRIE N° 71 — Expériences n°s 6 et 7

Rayon du cercle r	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$
0 / 0,10	1,138 (4)	0,025
0,20	1,128 (7)	0,027
0,30	1,114 (9)	0,024
0,40	1,083 (11)	0,033
0,50	1,023 (15)	0,043
0,575	0,930 (17)	0,043
0,60	0,852 (17)	0,042
Paroi à 0,625	»	»

SÉRIE N° 72 — Expérience n° 5

Rayon du cercle r	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$
0 / 0,10	1,139 (4)	0,033
0,20	1,119 (7)	0,040
0,30	1,083 (9)	0,025
0,40	1,037 (11)	0,043
0,50	0,973 (15)	0,044
0,60	0,777 (17)	0,060
Paroi à 0,625	»	»

SÉRIE N° 73 — Expérience n° 4

Rayon du cercle r	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$
0 / 0,10	1,179 (4)	0,038
0,20	1,166 (7)	0,019
0,30	1,155 (9)	0,036
0,40	1,114 (11)	0,044
0,50	1,066 (15)	0,070
0,60	0,968 (17)	0,073
0,67	0,816 (19)	0,073
Paroi à 0,70	»	»

SÉRIE N° 74 — Expérience n° 4

Rayon du cercle r	$\frac{v}{U}$	$\frac{g\delta h}{v}$
0 / 0,10	1,167 (4)	0,027
0,15	1,157 (5)	[illegible]
0,20	1,176 (7)	[illegible]
0,25	1,163 (7)	[illegible]
0,30	1,146 (9)	0,039
0,40	1,082 (11)	[illegible]
0,50	0,922 (15)	0,054
0,56	0,791 (17)	0,047
0,585	0,675 (17)	0,052
Paroi à 0,61	»	»

On en déduit immédiatement pour M et N :

DÉSIGNATION DES SÉRIES	RÉGION des plus grandes vitesses			PÉRIMÈTRE		
	Δ	$\frac{V}{U}-1$	M	$\frac{g\delta h}{v}-\Delta$	$\frac{V-v}{U}$	N
Série n° 71. . .	0,025	0,138	0,18	0,017	0,286	0,059
— 72. . .	0,033	0,139	0,24	0,027	0,362	0,075
— 73. . .	0,038	0,179	0,21	0,035	0,363	0,097
— 74. . .	0,035	0,218	0,16	0,017	0,543	0,031
Moyennes.			0,197	. . . .		0,066

Les valeurs de $\frac{V}{U}$ et Δ (région centrale) ont été calculées pour les trois premières séries en faisant la moyenne de quatre points situés : le 1er, au centre, et les trois autres sur le 1er cercle ($r = 0^m,10$); mais, pour la série n° 74, la vitesse maximum n'étant plus à la surface, nous avons pris la moyenne de trois points

situés sur le 2e cercle ($r = 0^m,20$) où se trouvaient les plus grandes vitesses.

Les constantes qui résultent du calcul précédent sont inférieures à celles qu'avait fournies la discussion des expériences sur les canaux rectangulaires ; examinons maintenant les expériences dans lesquelles le niveau de l'eau n'atteignait pas le diamètre du canal circulaire. Les différences de vitesses n'étant pas très grandes, il nous suffira de considérer la région centrale et le périmètre, ainsi que nous l'avons déjà fait ailleurs dans des cas analogues.

DÉSIGNATION DES SÉRIES		VALEURS DE $\frac{v}{U}$		VALEURS DE $\frac{g\delta h}{v}$	
		Région des plus grandes vitesses	Périmètre	Région des plus grandes vitesses	Périmètre
Série n° 71	Expérience n° 1	1,232 (3)	0,900 (11)	0,032	0,048
	— 2	1,190 (3)	0,869 (11)	0,031	0,050
	— 3	1,163 (3)	0,867 (13)	0,027	0,050
	— 4	1,168 (3)	0,847 (13)	0,023	0,046
	— 5	1.198 (3)	0,905 (15)	0,021	0,055
Moyennes de la série. .		1.190	0,878	0,027	0,050
Série n° 72	Expérience n° 1	1,181 (3)	0,897 (9)	0,015	0,047
	— 2	1,186 (3)	0,906 (13)	0,020	0,038
	— 3	1,180 (3)	0,877 (15)	0,030	0,039
	— 4	1,123 (3)	0,813 (13)	0,047	0,038
Moyennes de la série. .		1,168	0,873	0,036	0,041
Série n° 73	Expérience n° 1	1,221 (3)	0,909 (11)	0,041	0,035
	— 2	1,219 (3)	0,918 (17)	0,032	0,029
	— 3	1,179 (3)	0,814 (19)	0,023	0,029
Moyennes de la série. .		1.206	0,880	0,032	0,032
Série n° 74	Expérience n° 1	1,266 (3)	0,688 (11)	0,033	0,065
	— 2	1,219 (3)	0,745 (13)	0,021	0,043
	— 3	1,218 (3)	0,705 (15)	0,028	0,056
Moyennes de la série. .		1.234	0,713	0,027	0,054

Les valeurs de M et de N calculées à l'aide de ce tableau renferment beaucoup d'anomalies, surtout celles de la série n° 73 où les valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$ ne sont pas plus

grandes au périmètre que dans la région centrale, et qu'il convient d'exclure pour ce motif.

DÉSIGNATION DES SÉRIES	RÉGION des plus grandes vitesses			PÉRIMÈTRE		
	Δ	$\frac{V}{U} - 1$	M	$\frac{g \delta h}{v} - \Delta$	$\frac{V - v}{U}$	N
Série n° 71. 5 expér. . .	0,027	0,190	0,142	0,023	0,312	0,074
— 72 4 — . . .	0,036	0,168	0,214	0,005	0,295	0,017
— 73 3 — . . .	0,032	0,206	0,155	0,001	0,326	0,003
— 74 3 — . . .	0,027	0,234	0,115	0,027	0,521	0,052
Moyennes générales en excluant la série n° 73			0,159	. . . .		0,050

Ces nouvelles valeurs sont un peu plus petites que celles qui correspondent aux expériences où l'eau atteignait le diamètre, le rapport des deux coefficients restant toujours à peu près le même.

EXPÉRIENCES SUR LES TUYAUX RECTANGULAIRES EN PLANCHES.

Séries n[os] 51 et 52.

Il ne nous reste plus à examiner que quelques expériences entreprises en 1857 et 1858 dans le but de comparer les conditions de l'écoulement dans une même section rectangulaire fonctionnant successivement comme tuyau fermé et comme canal découvert. On avait établi à cet effet en 1857 un tuyau rectangulaire de $0^{m},80$ de largeur sur $0^{m},50$ de hauteur; on y fit couler plusieurs volumes d'eau (série n° 51) et l'on mesura pour trois volumes différents les vitesses en 45 points répartis symétriquement autour du centre de la section; on enleva ensuite la paroi supérieure du tuyau et on le fit fonctionner comme canal découvert (série n° 53).

Les mêmes expériences furent renouvelées en 1859 sur un tuyau plus petit (séries nos 52 et 54) dans des conditions absolument semblables, les dimensions (largeur et hauteur) du tuyau et les distances de tous les points observés ayant été simplement réduites dans le rapport de 5 à 3.

Les données fondamentales des six expériences qui forment les séries nos 51 et 52 sont les suivantes :

DÉSIGNATION DES SÉRIES	NUMÉROS des expériences	DÉBIT par seconde	VITESSE moyenne dans le tuyau U	PERTE de charge par mètre courant I	VALEUR DU COEFFICIENT $A=\frac{RI}{U^2}$	
		m.	mc.			
Série n° 51 (tuyau de 0m,80 sur 0m,50).	1	0,411	1,028	0,00190	0,000277	Moyenne A = 0,000275
	2	0,618	1,545	0,00427	0,000275	
	3	0,674	1,685	0,00506	0,000274	
Série n° 52 (tuyau de 0m,48 sur 0m,30).	1	0,129	0,896	0,00273	0,000314	Moyenne A = 0,000318
	2	0,191	1,326	0,00627	0,000329	
	3	0,233	1,618	0,00880	0,000.310	

On voit que, malgré les variations assez étendues de I, le coefficient $\frac{RI}{U^2}$ est resté constant pour chaque série.

Nous calculerons les valeurs de $\frac{v}{U}$ et $\frac{g\delta h}{v}$:

1° Pour la région centrale, comprenant 3 points;

2° Pour la région périmétrique, comprenant 24 points.

DÉSIGNATION DES SÉRIES		VALEURS DE $\frac{v}{U}$		VALEURS DE $\frac{g\delta h}{v}$	
		Région centrale	Périmètre	Région centrale	Périmètre
Série n° 51	Expérience n° 1	1,168	0,843	0,026	0,087
	— 2	1,171	0,866	0,033	0,122
	— 3	1,163	0,859	0,046	0,103
Moyennes de la série.		1,167	0,856	0,035	0.104
Série n° 52	Expérience n° 1	1,218	0,807	0,028	0,137
	— 2	1,227	0,847	0,054	0,131
	— 3	1,211	0,845	0,069	0,132
Moyennes de la série.		1,219	0,833	0,050	0,133

On en déduit pour les valeurs moyennes de M et N correspondantes à chacune des deux séries :

DÉSIGNATION DES SÉRIES	RÉGION CENTRALE			PÉRIMÈTRE		
	Δ	$\frac{V}{U}-1$	M	$\frac{g\delta h}{v}-\Delta$	$\frac{V-v}{U}$	N
Série n° 51. . . .	0,035	0,167	0,210	0,069	0,311	0,222
— 52. . . .	0,050	0,219	0,229	0,083	0,386	0,215
Moyennes.			0,220	. . . .		0,219

Le rapport des deux coefficients qui dans toutes les expériences précédemment discutées était environ 1/3 est cette fois complètement modifié, puisque l'on a M = N.

La répartition des vitesses n'est pas la même dans un tuyau fermé et dans un canal à ciel ouvert. C'est ce qu'ont démontré les expériences comparatives des séries n°s 53 et 54. En enlevant la paroi supérieure des tuyaux et les faisant fonctionner à ciel ouvert de telle sorte que le niveau de l'eau vînt affleurer le centre, on a pu constater que, pour une même valeur de I (pente du canal à ciel ouvert, perte de charge du tuyau), le débit

du canal découvert est sensiblement égal à la moitié du débit du tuyau, mais que les vitesses ne sont pas réparties de la même manière dans les deux sections transversales (*); il n'est donc pas surprenant que le rapport des deux coefficients M et N diffère dans les deux cas.

RÉSUMÉ DE LA DISCUSSION PRÉCÉDENTE.

Il résulte de la discussion qui précède que l'on peut poser :

$$\text{(1)} \qquad \frac{g\delta h}{v} = \Delta + N\left(\frac{V-v}{U}\right),$$

la quantité Δ étant elle-même donnée par la formule :

$$\text{(2)} \qquad \Delta = M\left(\frac{V}{U} - 1\right);$$

les valeurs absolues de M et de N dépendent des procédés d'expérimentation; comparons en effet toutes celles que nous avons obtenues pour ces deux coefficients, en classant les groupes d'expériences par ordre de date.

On voit à l'inspection du tableau ci-après qu'en partant des premières expériences un peu sommaires de 1856, pour aboutir aux grandes séries d'expériences à quatre lectures de 1858 et 1859, les résultats se régularisent progressivement; les valeurs de M et N vont en croissant, tout en conservant sensiblement le même rapport; les résultats fournis par le dernier groupe sont ceux qui méritent le plus de confiance, tant par le nombre que par la régularité des observations.

(*) Voir pour cette discussion : *Recherches hydrauliques*, p. 176 et 177.

DÉSIGNATION des groupes D'EXPÉRIENCES	DATES	NOMBRE pour chaque groupe — des expériences	NOMBRE pour chaque groupe — des vitesses mesurées	VALEURS de — M	VALEURS de — N	VALEUR du rapport $\frac{N}{M}$	OBSERVATIONS
Sér. nos 86 à 88	Août, sept. 1856.	15	473	incertaines			Expériences à 3 lectures assez sommaires, peu de vitesses mesurées pour chaque expérience.
Sér. nos 55 à 57, 69 et 70.	Sept. 1856 à juill. 1857.	15	560	0,109	0,044	0,40	Expériences à 3 lectures, sauf les deux petites séries nos 53 et 67 qui ont été faites à 4 lectures, mais l'observateur évitait souvent encore l'inscription des maxima et minima un peu accusés.
Sér. nos 53 et 67.	Mars 1858.	4	144				
Sér. nos 71 à 74 (Canaux demi-circul.).	Sept. 1857 à mars 1858.						Expériences mixtes partie à 3 lectures et partie à 4 lectures.
		12	521	0,159	0,050	0,31	Premières valeurs de M et N fournies par les expériences dans lesquelles le niveau de l'eau n'atteignait pas le diamètre.
		5	397	0,197	0,066	0,33	Deuxièmes valeurs fournies par les expériences plus complètes dans lesquelles le niveau de l'eau atteignait le diamètre. On a exclu des moyennes l'expérience nº 8 de la série nº 71 et les expériences nos 1, 2, 3 de la série nº 73.
Sér. nos 54, 58 à 66, 68, 75, 84 et 85.	Mai 1858 à août 1859.	43	1.740	0,357	0,107	0,30	Expériences exécutées très régulièrement à 4 lectures (2 maxima et 2 minima d'amplitude ordinaire) et parfaitement comparables entre elles. On a exclu des moyennes l'expérience nº 2 de la série nº 60.

Transformons les équations (1) et (2) afin de mettre mieux en évidence l'effet de la résistance des parois. Nous avons été conduit, par la discussion des expériences sur la distribution des vitesses (*Recherches hydrauliques*, 3e partie, chap. IV), à poser, pour les cas simples d'un canal rectangulaire de largeur indéfinie et d'un canal demi-circulaire, les formules ci-après :

Canal rectangulaire de profondeur H : $V - v = K\sqrt{HI}\left(\frac{h}{H}\right)^2,$

Canal demi-circulaire de rayon R : $V - v = K'\sqrt{RI}\left(\frac{r}{R}\right)^3.$

I désigne dans ces expressions la pente longitudinale, K et K′ des constantes, h la distance à la surface (canal rectangulaire) et r la distance au centre (canal demi-circulaire) du point où a lieu la vitesse v.

En généralisant, on serait amené à poser pour un canal de forme quelconque

$$\text{(3)} \qquad V - v = \varphi\sqrt{RI},$$

R étant cette fois le rayon moyen et φ une fonction des coordonnées du point considéré, qui conserverait, comme les quantités $\left(\frac{h}{H}\right)^2$ et $\left(\frac{r}{R}\right)^2$ les mêmes valeurs pour les points homologues de deux sections semblables.

Si l'on divise par la vitesse moyenne U les deux membres de l'équation (3), on a, en désignant par A le coefficient $\frac{RI}{U^2}$:

$$\text{(4)} \qquad \frac{V - v}{U} = \varphi\sqrt{A}.$$

Ce coefficient qui caractérise la résistance des parois est aussi le module des variations des vitesses, variations d'autant plus prononcées que la paroi est plus rugueuse.

On déduit encore de l'équation (3) la relation suivante entre les vitesses moyenne et maximum :

$$V - U = \beta\sqrt{RI},$$

ou en divisant par U :

$$\text{(5)} \qquad \frac{V}{U} - 1 = \beta\sqrt{A},$$

β étant un coefficient qui dépend de la forme de la section transversale (*).

(*) La plus petite valeur de β correspond au cas d'un courant de profondeur uniforme et de largeur indéfinie dans lequel l'influence des parois latérales serait complètement éliminée. Dans ce cas extrême $\beta = 8$ environ. Mais ce minimum purement théorique n'est pas réalisable et la moyenne d'un grand nombre d'expériences nous a conduit à faire $\beta = 14$ dans les applications pratiques (voir *Recherches hydrauliques*, p. 237).

En reportant les valeurs ci-dessus de $\frac{V-v}{U}$ et $\frac{V}{U}-1$ dans les équations (1) et (2), elles deviennent :

$$(6) \qquad \Delta = M\beta\sqrt{A},$$

$$(7) \qquad \frac{g\delta h}{v} = \Delta + N\varphi\sqrt{A} = M\beta\left(1+\frac{N}{M}\frac{\varphi}{\beta}\right)\sqrt{A}.$$

Essayons d'interpréter ces relations; il faut d'abord se rendre compte de ce que représente la quantité $\frac{g\delta h}{v}$ ou $\frac{g(h'-h'')}{v}$. Si chaque vitesse (maximum ou minimum) se maintenait pendant un temps assez long pour que la permanence fût à peu près réalisée au point considéré, h' et h'' seraient bien les hauteurs dues aux vitesses et l'on aurait :

$$\frac{g\delta h}{v} = \frac{g}{v}\left(\frac{v'^2}{2g} - \frac{v''^2}{2g}\right) = \frac{v'+v''}{2v}(v'-v''),$$

ou, à fort peu près, en remarquant que v diffère peu de $\frac{v'+v''}{2}$:

$$\frac{g\delta h}{v} = v' - v''.$$

Mais les choses ne se passent pas aussi simplement. En premier lieu, la petitesse de l'ouverture des ajutages et l'inertie des colonnes liquides de l'instrument ne lui permettent pas, comme nous l'avons déjà remarqué, de suivre toutes les variations de la vitesse, dont ses indications successives ne sont que l'image affaiblie. D'un autre côté, au moment où se produit une variation importante et rapide, la pression du fluide sur les orifices ne peut plus servir à mesurer la vitesse, comme elle l[e] ferait dans un régime permanent. Ces périodes de chan[-]gement brusque ne comprennent toutefois que la moindr[e] partie du temps total. Si l'on observe le mouvement de[s]

deux colonnes dans le tube jaugeur, on les voit habituellement exécuter pendant quelques secondes des oscillations de peu d'amplitude; survient ensuite une dénivellation plus considérable qui modifie le niveau moyen autour duquel s'opéraient les oscillations, puis une nouvelle période de calme relatif et ainsi de suite. Ces moments de calme sont choisis pour la lecture, à l'exclusion des soubresauts trop rapides; la hauteur h' ou h'' mesurée dans ces conditions représente donc déjà une sorte de moyenne correspondant à une période de régime oscillatoire plus ou moins régulier.

La quantité $\frac{g\delta h}{v}$ peut donc nous donner une indication de la variation des vitesses; elle n'est pas, il est vrai, proportionnelle à $v'-v''$, mais, dans les conditions où elle a été mesurée, elle croît ou décroît vraisemblablement en même temps que cette différence, et nous montrera par ses variations, comment les écarts $v'-v''$ se répartissent dans l'étendue de la section transversale d'un courant. Les équations (6 et 7) font voir que les valeurs de Δ et $\frac{g\delta h}{v}$ sont proportionnelles à $\sqrt{A}$, c'est-à-dire que l'amplitude des oscillations irait en croissant avec la résistance à la paroi; elles montrent également que cette amplitude décroîtrait à mesure que l'on s'éloigne des parois (*). Ces résultats n'ont rien que de très naturel, si l'on se rend compte de l'origine des mouvements tourbillonnaires et de leur propagation dans la section du courant.

(*) Les expériences faites à l'aide du moulinet sur les grands cours d'eau paraissent, en effet, établir que les variations de la vitesse sont particulièrement importantes dans le voisinage du fond; mais leur développement y exige plus de temps qu'aux environs de la surface, où les variations ont une moindre amplitude et se succèdent plus rapidement (voir les observations de M. Harlacher, *Die Messungen in der Elbe und Donau*).

Supposons pour un instant un canal prismatique régulier, dont les parois très lisses n'exerceraient sur les filets fluides qu'un frottement tangentiel insensible. Il est clair que, dans un semblable canal, le coefficient A serait presque nul; les mouvements intérieurs du fluide se réduisant à un simple glissement relatif et continu des couches, les vitesses différeraient fort peu les unes des autres et leurs oscillations seraient inappréciables.

Un canal sans frottement, dans lequel, du reste, le régime uniforme ne saurait subsister, est évidemment irréalisable; toute paroi présente des aspérités, les filets fluides viennent s'y heurter et de ces chocs naissent des mouvements tourbillonnaires, dont l'amplitude croît promptement avec la saillie des aspérités; ces mouvements se propagent dans toute la masse, et par leur passage à intervalles plus ou moins réguliers en un point donné de la section, donnent naissance aux variations subites qu'y éprouve la vitesse (*); leur intensité a son maximum à la paroi, et, toutes choses égales d'ailleurs, va en croissant avec le relief des aspérités, c'est-à-dire avec le coefficient $\sqrt{A}$, ainsi que l'indiquent les équations (6) et (7).

L'écoulement dans le canal le plus régulier est un phénomène extrêmement complexe dans lequel le simple glissement des couches liquides ne joue qu'un rôle secondaire; la masse du courant est sans cesse traversée par des mouvements giratoires partis de la paroi, qui en mélangent toutes les couches et viennent même s'épanouir à

(*) Le tube jaugeur n'accuse que la composante des vitesses parallèle à l'axe du courant, et ne fournit aucune indication sur les composantes transversales qui se produisent de temps en temps au passage d'un mouvement tourbillonnaire; ces composantes, beaucoup plus difficiles à saisir, varient sans cesse en grandeur et en direction, et leur moyenne, même pendant un temps assez court, est nulle; la composante longitudinale dont les moyennes donnent les vitesses de débit, est la seule qu'il importe de connaître.

la surface en donnant naissance à des ondulations. Au premier abord tout paraît confus et irrégulier; mais ce désordre n'est qu'apparent, et si l'on fait, même pour un temps assez court, les moyennes de toutes les vitesses qui se succèdent rapidement en chaque point de la section, des lois précises se manifestent bientôt; ces moyennes prennent une valeur parfaitement déterminée autour de laquelle les vitesses instantanées oscillent avec une sorte de périodicité.

La distribution des vitesses est étroitement liée au mode de propagation des tourbillons à partir des parois, et c'est surtout aux environs de la surface que leur libre épanouissement donne lieu à des anomalies en apparence inexplicables. Nous avons vu par les expériences comparatives des séries n°s 51 à 54, combien l'écoulement dans un tuyau rectangulaire diffère de l'écoulement à ciel ouvert. Dans le tuyau fermé, les courbes d'égale vitesse, parfaitement régulières, ont une forme très simple et figurent à fort peu près des rectangles concentriques et équidistants; dans le canal à ciel ouvert, cette forme se complique et la plus grande vitesse est au-dessous de la surface, l'influence des parois latérales se faisant sentir sur toute la largeur du courant. Cette différence dans les conditions de l'écoulement est manifestée par le changement du rapport $\frac{N}{M}$, auquel les expériences à ciel ouvert assigneraient la valeur 0,3, tandis que l'on a $N=M$ dans les tuyaux fermés.

Les formules (6) et (7) ne tiennent pas compte de la grandeur absolue de la section; il ne pouvait en être autrement, puisque nos expériences ne portaient que sur des canaux de dimensions à peu près semblables. L'influence des dimensions absolues était par cela même éliminée; elle doit cependant être considérable, si l'on en juge par les tourbillons qui sillonnent la surface des

cours d'eau naturels. Ces mouvements expliquent même comment il se fait que la valeur du coefficient $\sqrt{A}$ se maintienne presque constante dans les grands cours d'eau, malgré l'augmentation du rayon moyen R, contrairement à ce qui se passerait dans les canaux artificiels. Il semble en effet au premier abord, que dans un fleuve l'influence des aspérités des parois devrait s'effacer devant les grandes dimensions du lit; il en serait ainsi dans un canal de section régulière. Mais, dans les cours d'eau naturels, le lit, dont la profondeur et la largeur varient sans cesse, ne peut jamais être assimilé à un canal prismatique; ces variations de section, comparables aux dimensions du lit, donnent lieu à des mouvements irréguliers d'une amplitude considérable, de sorte que le coefficient $\sqrt{A}$ peut conserver la même valeur pour un grand fleuve et pour un cours d'eau de largeur médiocre, ainsi que l'ont constaté divers observateurs.

Résumons en peu de mots les résultats de cette longue discussion. Les données expérimentales dont nous disposions n'avaient nullement été coordonnées en vue de déterminer les oscillations des vitesses autour de leur moyenne; c'était cette moyenne seule que l'on avait cherché à obtenir et les lois des oscillations n'ont été consignées que d'une manière inconsciente par les observateurs. Les procédés d'expérimentation ayant un peu varié, ou, pour mieux dire, s'étant progressivement régularisés, nous avons dû opérer entre les nombreuses données recueillies dans un espace de trois années, un triage assez délicat. L'étude des groupes ainsi formés nous a conduit aux deux équations (6) et (7) dans lesquelles figurent deux coefficients M et N, dont les valeurs croissent avec le degré de régularité des observations, le rapport $\frac{N}{M}$ restant remarquablement constant et peu différent de 0,3. Dans un tuyau fermé, ce rapport devient

égal à l'unité, ce qui accuse une profonde différence dans les conditions de l'écoulement.

Nous avons reconnu ainsi que les valeurs de $\frac{g\delta h}{v}$ ont leur maximum à la paroi et décroissent à partir de cette paroi en variant à peu près comme le rapport $\frac{V-v}{U}$, c'est-à-dire qu'elles sont sensiblement les mêmes sur tout le parcours d'une courbe d'égale vitesse; elles varient, en outre, entre deux canaux de dimensions comparables, proportionnellement au coefficient $\sqrt{A}$, qui mesure la résistance des parois. Peut-on légitimement étendre ces conclusions aux variations δv de la vitesse, qu'aucun procédé d'observation ne saurait mesurer dans leur succession rapide? L'observation des vitesses n'est possible que par l'intermédiaire d'un mécanisme quelconque et ne fournit que des quantités ayant, comme δh ou $\frac{\delta h}{v}$, une certaine relation, très difficile à préciser du reste, avec la variation δv. Pour conclure de la marche des valeurs de $\frac{\delta h}{v}$ à celle des valeurs de δv, il faut qu'elles croissent et décroissent en même temps; cette condition paraît assez bien remplie dans nos expériences.

Nous bornerons là ces considérations et nous n'essaierons pas de rechercher une interprétation théorique plus complète des résultats obtenus; dans l'état actuel de nos connaissances sur les mouvements des fluides, cette recherche serait singulièremeut hasardée et nous nous contenterons d'avoir mis en lumière quelques faits qui constitueront peut être un premier jalon dans une voie encore inexplorée.

Dijon, le 12 mars 1887.

N° 47

RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT

DES PIERRES PARTIELLEMENT CHARGÉES

Par M. FLAMANT, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Il arrive souvent, dans les constructions, que des pierres se trouvent avoir à supporter une charge qui n'est pas répartie sur toute l'étendue de leur face supérieure : lorsqu'une pierre sert de base à une colonne métallique, par exemple. Dans ce cas, quelle est la pression, par unité de surface, que l'on peut lui faire porter avec sécurité? Doit-on supposer la pression totale répartie sur toute la section transversale de cette pierre, ou seulement sur la partie qui est directement soumise à l'effort? Et si, comme il paraît rationnel, on admet un chiffre intermédiaire, dans quelle proportion peut-on augmenter l'un ou diminuer l'autre?

Il est difficile de répondre à ces questions, et les expériences connues jusqu'ici sur la résistance à l'écrasement des pierres ne donnent aucun enseignement : elles ont toujours été faites en répartissant la charge sur la superficie totale des blocs à écraser.

Vicat a donné, il est vrai, dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (1833, 2e semestre, p. 213), le résultat d'expériences qu'il a faites sur la résistance à l'écrasement de pyramides quadrangulaires tronquées parallèlement à leur base. Il a trouvé que, pour des blocs de cette

forme, comme pour les prismes, les charges de rupture étaient proportionnelles aux carrés des côtés homologues. Mais cette loi n'apprend rien sur le rapport qui peut exister entre la résistance de ces troncs de pyramides et celle de blocs cubiques ou prismatiques de même matière et de même base.

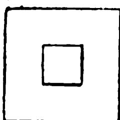
On trouve bien, dans ses tableaux d'expériences (tableaux n° 1, 4°, p. 258), les charges de rupture par écrasement de deux cubes de plâtre de 12 millimètres de côté, comprimés l'un entre deux plaques de 12 millimètres, l'autre entre deux plaques de 8 millimètres de côté. Ces charges de rupture sont respectivement de $56^k,32$ à $45^k,52$; mais Vicat ne tire aucune conclusion du rapprochement de ces deux chiffres, dont le rapport, 1,3 est intermédiaire entre ceux de la surface transversale du cube à celle de la plaque qui transmet la pression, rapports qui sont respectivement 1 et 2,25.

En vue de procurer aux ingénieurs quelques données sur ce sujet, j'ai demandé à M. L. Durand-Claye, directeur du laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, de vouloir bien faire procéder à quelques expériences d'écrasement sur les blocs pressés seulement sur une partie de leur surface.

Avec un empressement dont je suis heureux de le remercier, M. Durand-Claye a fait faire ces expériences en 1885 et en 1886, on en trouvera plus loin les résultats. Elles ont porté sur des blocs cubiques de 10 centimètres de côté et sur des blocs cylindriques de même hauteur et même diamètre ($0^m,10$). L'écrasement a été obtenu par la pression sur la face supérieure de blocs de fonte cubiques ou cylindriques et de dimensions variables; la face inférieure étant, soit appuyée de toute son étendue sur une plaque plus large qu'elle, soit, au contraire, placée elle-même sur un autre bloc en métal de dimensions plus petites.

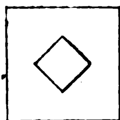
Ces expériences sont malheureusement peu nombreuses et il est difficile d'en tirer des lois ou des règles qui puissent inspirer une confiance absolue dans la pratique. Je crois cependant qu'il peut être utile de les faire connaître.

1re *série.* — Cubes de pierre tendre de 10 centimètres de côté. — Ces cubes, placés entre les plateaux de la presse hydraulique, s'appuyaient sur le plateau infé-



rieur par toute l'étendue de leur face inférieure. Au centre de leur face supérieure était placé un bloc de fonte ayant une section carrée de 1, 2, 3, 4..., 8 centimètres de côté, et c'est sur ce bloc que l'on exerçait la pression produisant la rupture. Les arêtes de ces blocs étaient parallèles à celles des cubes à écraser.

2e *série.* — Mêmes cubes. — Les arêtes des blocs étant placées diagonalement.



L'un des blocs, essayé à la manière ordinaire entre les deux plateaux de la presse, s'est écrasé sous la charge de 8.434 kilogrammes représentant 84^{k},34 par centimètre carré.

Le tableau suivant donne, pour ces deux séries, les charges ayant produit l'écrasement, rapportées au centimètre carré de la section transversale des cubes écrasés et au centimètre carré des blocs de fonte interposés sur la face supérieure.

PREMIÈRE SÉRIE				DEUXIÈME SÉRIE			
Dimensions des côtés des blocs de fonte	Charge totale	Charge par c.m.q. de la section entière des cubes	Charge par c.m.q. de la section du bloc interposé	Dimensions des côtés des blocs de fonte	Charge totale	Charge par c.m.q. de la section entière des cubes	Charge par c.m.q. de la section du bloc interposé
mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,01	1.204	12	1.204				
0,02	1.417	14	354	0,02	1.346	13	336
0,03	2.409	24	268	0,03	2.551	26	283
0,04	3.685	37	230	0,04	3.331	33	208
0,05	4.819	48	193	0,05	3.685	37	147
0,06	5.457	55	152	0,06	5.103	51	141
0,07	6.095	61	124	0,07	5.387	54	110
0,08	5.590	56	87	0,08	5.387	54	110
0,08	6.695	67	95				

3[e] *série*. — Cubes de ciment de $0^m,10$ de côté appuyés sur toute leur face inférieure et écrasés par les mêmes blocs de fonte, placés parallèlement aux arêtes.

4[e] *série*. — Mêmes cubes. — Les arêtes des blocs étant placées diagonalement comme dans la seconde série.

Deux de ces cubes de ciment, essayés à la manière ordinaire, se sont écrasés l'un sous une charge totale de 56.800 kilogrammes, l'autre sous une charge de 58.400 kilogrammes; ce qui représente en moyenne une résistance de 576 kilogrammes par centimètre carré.

TROISIÈME SÉRIE				QUATRIÈME SÉRIE			
Dimensions des côtés des blocs de fonte	Charge totale	Charge par c.m.q. de la section entière des cubes	Charge par c.m.q. de la section du bloc interposé	Dimensions des côtés des blocs de fonte	Charge totale	Charge par c.m.q. de la section entière des cubes	Charge par c.m.q. de la section du bloc interposé
mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,01	4.468	45	4.468	0,01	4.468	45	4.468
0,02	10.533	105	2.633	0,02	9.576	96	2.394
0,03	14 045	140	1.560	0,03	14.683	147	1.631
0,04	21.706	217	1.357	0,04	20.110	201	1.257
0,05	26.174	262	1.047	0,05	27.132	271	1.087
0,06	33.197	332	922	0,06	34.155	342	949
0,07	37 985	380	775	0,07	37.666	377	769
0,08	43.092	431	673	0,08	41 496	415	648

5e *série.* — Cubes en pierre tendre de $0^m,10$ de côté écrasés entre deux blocs de fonte de section carrée inférieure à la leur et dont les arêtes étaient placées parallèlement à celles du cube à écraser.

La pierre tendre était la même que celle des séries 1 et 2, c'est-à-dire s'écrasait sous une charge de 84 kilogrammes environ par centimètre carré.

6e *série.* — Mêmes expériences sur des cubes en ciment de $0^m,10$ de côté de même composition que ceux qui avaient servi aux expériences de la 3e et de la 4e série, c'est-à-dire présentant une résistance d'environ 576 kilogrammes par centimètre carré.

Dans ces deux séries d'expériences, le bloc le plus grand était toujours placé à la partie inférieure.

DIMENSIONS des côtés des blocs de fonte		CINQUIÈME SÉRIE			SIXIÈME SÉRIE		
		Charge totale	Charge par c.m.q. de la section du bloc		Charge totale	Charge par c.m.q. de la section du bloc	
supérieurs	inférieurs		supérieur	inférieur		supérieur	inférieur
		kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,01	0,01	»	»	»	4,468	4.468	4.468
0,01	0,03	1.488	1.488	165	4.468	4.468	496
0,01	0,05	1 417	1.417	56	4.468	4.468	179
0,01	0,07	1.275	1.275	26	4.468	4.468	91
0,02	0,02	1.913	478	478	6 704	1.676	1.676
0.02	0.04	1.984	496	124	8 300	2 075	519
0,02	0,06	1.559	390	43	7.660	1 915	213
0,02	0,08	1.204	301	19	7.980	1.995	125
0,03	0,03	1.772	197	197	9.576	1.064	1.064
0,03	0.05	1.630	181	65	12 771	1,419	511
0,03	0,07	2.268	252	46	14.049	1.561	287
0,04	0,04	2 693	168	168	11.488	718	718
0,04	0,06	3 473	217	96	13 088	818	364
0,04	0,08	3.118	195	49	16.562	1.037	259
0,05	0,05	2.268	91	91	14.375	575	575
0,05	0,07	3.756	150	97	16.275	651	332
0,06	0,06	3.685	102	102	17.244	479	479
0,06	0,08	5.954	165	93	26.172	727	409
0,07	0,07	3.402	69	69	28.077	573	573
0,08	0,08	6.237	97	97	29 376	459	459

7e *série*. — Cylindres en pierre tendre de $0^{m},10$ de hauteur et de $0^{m},10$ de diamètre. — Ces cylindres, placés entre les plateaux de la presse hydraulique, s'appuyaient sur le plateau inférieur par toute l'étendue de leur base inférieure. Au centre de leur base supérieure était placé un bloc d'acier de forme cylindrique de 1, 2,... 8 centimètres de diamètre, sur lequel on exerçait la pression produisant la rupture.

8e *série*. — Cylindres en pierre tendre de $0^{m},10$ de diamètre placés entre deux blocs cylindriques en acier de même diamètre; cette dimension étant inférieure à celle du cylindre à écraser.

Deux de ces cylindres, essayés à la manière ordinaire, par des pressions s'étendant sur toute la surface de leurs bases, se sont rompus, l'un sous une charge totale de 4.182 kilogrammes, l'autre sous une charge de 3.618 kilogrammes, correspondant respectivement à des pressions de 53 kilogrammes et de 46 kilogrammes par centimètre carré.

DIAMÈTRE des blocs en acier	SEPTIÈME SÉRIE			HUITIÈME SÉRIE		
	Charge totale	Charge par c.m.q.		Charge totale	Charge par c.m.q.	
		de la section entière des cylindres de pierre	de la section du bloc interposé		de la section entière des cylindres de pierre	de la section du bloc interposé
mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,01	1.488	19	1.896	»	»	»
0,02	1.772	23	572	1.417	18	457
0,03	1.772	23	250	2.409	31	339
0,04	3 331	42	264	1.630	21	129
0,05	3.685	47	188	2.835	36	145
0,06	2 693	34	95	3.331	42	118
0,06	3.118	40	110	»	»	»
0,07	4 465	57	116	4.394	56	114
0,08	4.111	52	82	3.685	47	73 (*)

(*) Cette pierre était délitée.

9[e] et 10[e] *séries.* — Prismes en pierre tendre, à base carrée de 10 centimètres de côté et de 20 centimètres de hauteur, appuyés sur toute l'étendue de leur base inférieure et écrasés par un bloc carré, placé au centre de la face supérieure parallèlement aux côtés des prismes dans la 9[e] série, et diagonalement dans la 10[e].

L'un de ces prismes, essayé à la manière ordinaire entre les deux plateaux de la presse, s'est écrasé sous une charge totale de 8.222 kilogrammes, correspondant à 82[k],22 par centimètre carré.

DIMENSIONS des côtés des blocs de fonte	NEUVIÈME SÉRIE			DIXIÈME SÉRIE		
	Charge totale	Charge par c.m.q.		Charge totale	Charge par c.m.q.	
		de la section entière des prismes de pierre	de la section du bloc interposé		de la section entière des prismes de pierre	de la section du bloc interposé
mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,03	2.268	23	252	2.906	29	323
0,05	4.749	47	190	5 032	50	201
0,07	7.371	74	150	6 166	62	126

Les dessins des cassures, dans toutes ces expériences, ont été relevés avec soin; j'en reproduis quelques-uns se rapportant aux expériences de la 1[re] et de la 2[e] série. Sous l'action de la pression, le bloc métallique, surtout lorsque sa dimension est faible, pénètre dans la pierre qui se comprime sous la pression. On a constaté que le bloc de 0[m],01 de côté s'enfonçait ainsi de 0[m],02 au moins, dans la pierre tendre, avant de produire la rupture. A partir de 0[m],04 de côté, l'enfoncement était à peine appréciable, mais il était encore de près de 1 centimètre pour le bloc de 0[m],02 de côté.

Sous l'influence de cette compression, la partie de la pierre qui se trouve directement au-dessous du bloc se désagrège et change complètement d'aspect dans une

étendue variable, mais limitée à peu près à une sorte de pyramide irrégulière ayant son sommet en bas et pour base la surface pressée. La rupture se produit par des fentes se propageant du centre à la périphérie et analogues à celles que produit l'enfoncement d'un coin dans une pièce de bois.

Les lignes ponctuées (en points ronds) montrent la forme de ces sortes de pyramides désagrégées à l'enfoncement desquelles la rupture semble due.

Quelle conclusion pratique peut-on tirer de ces expériences? C'est ce qui reste à examiner.

Tout d'abord, celles de la 7e et de la 8e série sur des blocs cylindriques semblent devoir être écartées. Par suite de causes qui ne sont pas déterminées et qui tiennent peut-être à la taille de ces pierres, les résultats de ces expériences sont discordants et ne paraissent pas suivre une loi régulière.

Celles des séries 5 et 6 relatives à l'écrasement entre deux blocs métalliques de dimensions moindres que la pierre elle-même ne paraissent pas directement applicables à la pratique. Il est rare que des pierres se trouvent, dans les constructions, dans des conditions assimilables à celles de ces expériences. Celles-ci pourront servir de base à des déductions théoriques, mais ne semblent pas devoir conduire à des conséquences pratiques immédiates. Je les laisserai donc provisoirement de côté avec d'autant plus de raison que les résultats en semblent, dans certains cas, contradictoires.

Il ne reste plus ainsi à comparer que les résultats des séries 1, 2, 3, 4, 9 et 10, relatives à des expériences d'écrasement de pierres cubiques ou prismatiques, appuyées sur toute l'étendue de leur base inférieure, et pressées au centre de leur base supérieure sur une surface plus ou moins grande.

Si l'on se borne aux expériences qui se rapprochent le plus des conditions pratiques moyennes dans lesquelles la surface pressée varie du dixième à la moitié environ de la section totale de la pierre, c'est-à-dire à celles où l'écrasement a été produit par la pression d'un bloc métallique de $0^m,03$ à $0^m,07$ de côté (ce qui représente une surface pressée variant des 0,09 aux 0,49 de la section totale de la pierre), on reconnaît qu'il est à peu près indifférent, au point de vue de la résistance, que le bloc qui transmet la pression soit parallèle aux côtés du prisme, ou qu'il soit placé diagonalement.

Les chiffres correspondant aux charges de rupture dans l'un des cas sont tantôt plus faibles, tantôt plus forts que dans l'autre, et bien que l'on puisse remarquer une légère infériorité pour le cas où les arêtes du bloc sont parallèles aux diagonales, la différence est, en somme, assez faible.

Cela étant, on peut voir aussi que la charge que produit la rupture est, dans les mêmes limites d'approximation, sensiblement proportionnelle à la moyenne géométrique entre le côté du carré du prisme de pierre écrasé et celui du bloc qui transmet la pression, c'est-à-dire qu'elle peut, approximativement, être égale à la charge de rupture, par unité de surface de la pierre essayée, multipliée par la surface d'un rectangle dont les deux côtés seraient celui du bloc à écraser et celui du bloc qui transmet la pression.

Analytiquement, si A représente le côté d'une pierre carrée appuyée sur sa face intérieure et portant au centre de sa base supérieure un bloc carré de côté a; si R_1 représente la charge de rupture par unité de surface de la pierre dont il s'agit, lorsqu'on l'écrase à la manière ordinaire, par des pressions réparties sur toute l'étendue de ses deux bases opposées, de telle sorte que R_1A^2 soit la charge totale qui produirait l'écrasement de la pierre

carrée de côté A ; la charge P qui, appliquée sur la surface carrée de côté a, au centre de la base supérieure, produira la rupture de cette pierre, pourra être exprimée approximativement par la formule empirique

$$P = R_1 A a.$$

La comparaison des résultats des expériences des séries 9 et 10 à ceux des séries 1 et 2 montre d'ailleurs que la hauteur de la pierre soumise à l'écrasement est à peu près indifférente, dans les limites entre lesquelles ces expériences ont été faites. Ce résultat serait probablement infirmé si les hauteurs avaient varié dans des limites plus étendues.

Le tableau suivant montre, pour les quatre premières séries d'expériences, dans quelles limites d'approximation la formule empirique ci-dessus s'accorde avec les résultats expérimentaux.

DIMENSIONS des côtés des blocs de fonte	PREMIÈRE SÉRIE — Charge de rupture		DEUXIÈME SÉRIE — Charge de rupture		TROISIÈME SÉRIE — Charge de rupture		QUATRIÈME SÉRIE — Charge de rupture	
	observée	calculée	observée	calculée	observée	calculée	observée	calculée
mèt.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
0,03	2.409	2 530	2 551	2.530	14.045	17.280	14.683	17.280
0,04	3.685	3 374	3.331	3.374	21 706	23 040	20 110	23 040
0,05	4 819	4.217	3.685	4 217	26.174	28 800	27.132	28 800
0,06	5.457	5 060	5.103	5.060	33 197	34 560	34.155	34.560
0,07	6.095	5.904	5.387	5.904	37.985	40.320	37.666	40.320

La différence entre le calcul et l'observation est toujours inférieure à 15 p. 100 et elle est presque toujours inférieure à 10 p. 100, c'est-à-dire que l'approximation serait suffisante pour les besoins de la pratique.

Peut-être des expériences plus nombreuses et plus variées feraient-elles reconnaître la nécessité d'adopter, au lieu de la formule empirique précédente, une autre for-

mule plus compliquée, ou tout au moins de l'affecter d'un coefficient numérique à déterminer ; mais, telle qu'elle est, elle s'accorde avec les expériences qui viennent d'être rapportées.

Dans ces conditions, si l'on admet un même rapport entre la charge de sécurité et la charge de rupture, la formule suivante donnera approximativement la charge P′ que l'on peut faire supporter avec sécurité à une pierre carrée de côté A, cette charge étant appliquée au centre de sa face supérieure sur un carré de côté a et la charge de sécurité de la pierre dont il s'agit étant R_0 :

$$P = Aa\,R_0.$$

Il n'est pas inutile de rappeler d'une manière explicite que ce qui précède ne s'applique qu'aux pierres ayant servi aux expériences et aux limites de dimensions dans lesquelles ces expériences ont été faites. Ce n'est que par analogie ou induction que l'on pourra appliquer à d'autres pierres et à d'autres dimensions les résultats qui en ont été déduits.

Paris, le 15 mars 1887.

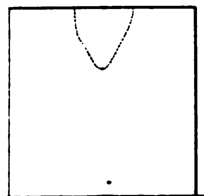
ECHANTILLONS DE PIERRES

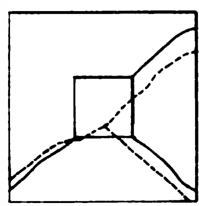
(Ec

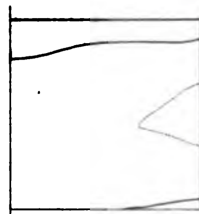
Bloc en fonte de 0^m03 de côté.

Blo

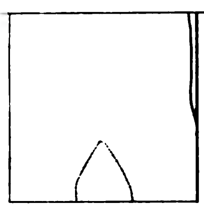
Série N° 1.



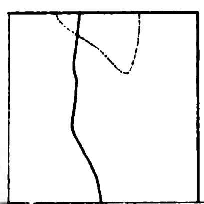


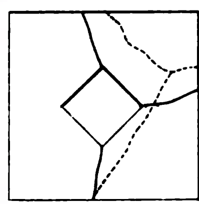


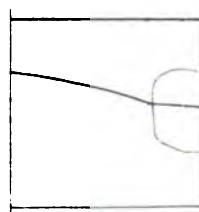




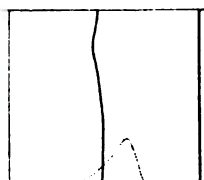
Série N° 2











N° 48

ÉTUDE ET ENQUÊTE (*)

SUR LES

CONDITIONS D'INSTALLATION ET DE FONCTIONNEMENT

DES CHAUDIÈRES DE PREMIÈRE CATÉGORIE

CHAUFFÉES

PAR LES FLAMMES PERDUES DES FOYERS MÉTALLURGIQUES

I. — CHAUDIÈRES VERTICALES.

A la suite du terrible accident d'Eurville, M. le Ministre des travaux publics a décidé, sur l'avis de la Commission centrale, qu'une enquête serait ouverte, par les soins des ingénieurs des mines, sur les conditions d'installation et de fonctionnement des chaudières de première catégorie chauffées par les flammes perdues des foyers métallurgiques.

HISTORIQUE.

Cette enquête était, d'ailleurs, la suite d'une situation

(*) L'étude des pièces relatives à cette enquête a été l'objet de l'examen d'une Sous-Commission, composée de MM. P. Luuyt, inspecteur général des mines, *président;* Farcot, constructeur de machines à vapeur; Haton de la Goupillière, inspecteur général des mines; Hirsch, ingénieur en chef des ponts et chaussées, et Michel Lévy, ingénieur en chef des mines, rapporteur près la Commission centrale des machines à vapeur.

Le rapport a été présenté à la Commission centrale, dans sa séance du 8 décembre 1885, par M. Michel Lévy, au nom de la Sous-Commission.

qui, depuis 1874, préoccupe l'Administration et la Commission centrale : trois grands désastres, causés par l'explosion de chaudières verticales chauffées par les flammes perdues de fours à puddler ou à réchauffer, se sont en effet succédé, en 1874 à Commentry, en 1883 à Marnaval, en 1884 à Eurville.

Rapport de M. Hanet-Cléry.

Dès 1878, une première enquête a lieu et M. l'ingénieur en chef des mines Hanet-Cléry, rapporteur près la Commission centrale, en consigne les résultats dans un rapport très complet (*) dont toutes les constatations et conclusions techniques sont restées applicables à la situation actuelle. Nous allons les énumérer sommairement; car l'enquête actuelle n'a révélé aucun agencement nouveau.

Chauffage. — Les types de chaudières verticales se rapportent à trois principales catégories :

1° **Chauffage extérieur.** — Les *rampants* normaux, tangentiels ou légèrement inclinés dans un plan vertical sur l'axe de la chaudière, amènent les gaz des fours métallurgiques dans un carneau circulaire concentrique à l'appareil, de 30 à 40 centimètres de largeur, parfois légèrement rétréci à sa partie supérieure.

Ce carneau est unique ou cloisonné. Dans le premier cas, les cheminées partent de la plate-forme supérieure. Dans le second, elles peuvent être indépendantes de la tour de maçonnerie qui enveloppe l'appareil; car les gaz chauds, après avoir monté, redescendent entre deux cloisons.

Tantôt la tour de maçonnerie s'arrête au-dessous du niveau moyen de l'eau et le dôme de vapeur émerge au-

(*) *Annales des mines*, 1878, XIV, 68.

dessus de la plate-forme. Tantôt ce dernier est également baigné par les gaz chauds; mais alors ils sont à l'état dormant, c'est-à-dire que les orifices inférieurs des cheminées ou ceux des carneaux de descente débouchent au-dessous du niveau de l'eau; de plus le dôme de vapeur est alors protégé par une enveloppe de briques réfractaires touchant les tôles.

2° Chauffage intérieur et extérieur. — Les gaz circulent d'abord à l'extérieur, puis redescendent par un tube central.

Dans ces deux premières catégories, les tôles du coup de feu sont parfois protégées par une murette en briques réfractaires qui est tantôt appliquée sur le métal, tantôt distante de quelques centimètres. Cette murette s'élève au-dessus de la génératrice supérieure du rampant; suivant les cas, elle entoure la chaudière, on n'en embrasse qu'une demi-conférence; elle présente parfois, suivant l'axe du rampant, un éperon destiné à diviser les flammes et à rendre leurs courants tangentiels.

3° Chauffage exclusivement intérieur. — La chaudière annulaire comporte un gros tube intérieur, souvent garni de tubes du système Field; les flammes y pénètrent toujours tangentiellement.

Forme des chaudières. — La forme des chaudières est en rapport avec le mode de chauffage.

1° Elles sont le plus souvent composées *d'un corps cylindrique unique*, présentant un diamètre de 1 mètre à $1^{m},40$. Le chauffage est alors extérieur et généralement à rampant normal, à carneau non cloisonné.

2° Elles sont parfois composées de *deux corps cylinbriques couplés*, ou associés à *un ou plusieurs bouilleurs*. Le chauffage, toujours extérieur, comporte alors généralement un rampant tangentiel et des carneaux cloisonnés.

Ces deux premiers types s'appliquent à des chaudières de grande capacité, de 10 à 30 mètres cubes.

3° *Les chaudières annulaires* à chauffage intérieur et extérieur, exclusivement usitées dans le département du Nord, ont également une grande capacité et un diamètre atteignant jusqu'à 3 mètres. Elles fonctionnent à des pressions relativement peu élevées et leur tube intérieur sert à la descente des gaz déjà refroidis.

4° Enfin, *les chaudières tubulaires et multitubulaires* sont encore en petit nombre. Leur capacité est très variable ; elles comportent en général un timbre élevé, une arrivée tangentielle des flammes et parfois un évasement des carneaux.

Appareils de sûreté. — Les appareils indicateurs du niveau de l'eau se composent principalement de flotteurs et de robinets de jauge. Ils sont extrêmement défectueux sur les chaudières verticales, soit en raison des brusques oscillations du niveau de l'eau dont la surface n'est pas en rapport avec la grande capacité des appareils, soit à cause de la difficulté de reporter les indications sous les yeux des chauffeurs.

Alimentation. — L'alimentation amène le plus souvent l'eau froide à la partie inférieure des chaudières verticales, et de plus elle est généralement intermittente. Il en résulte que les tôles du coup de feu, extérieurement exposées à de très hautes températures et parfois à des dards de flammes très chaudes, sont irrégulièrement et énergiquement refroidies à l'intérieur.

Il se produit ainsi des dilatations et des contractions alternatives, extrêmement nuisibles à la bonne conservation des rivures. Des fuites se déclarent souvent à la base des chaudières verticales ; elles provoquent alors la vidange partielle et rapide de l'appareil, ainsi que des corrosions dangereuses du métal.

Recommandations spéciales aux chaudières verticales. — En terminant son rapport, M. Hanet-Cléry résume, ainsi qu'il suit, les recommandations qu'il convient d'adresser aux industriels :

1° Les tôles du coup de feu doivent être protégées par une murette réfractaire éloignée de 80 à 100 millimètres du métal. Le contact direct pourrait provoquer des corrosions d'autant plus dangereuses qu'elles seraient masquées.

Autant que possible, le rampant doit amener les flammes tangentiellement au corps cylindrique; sinon il convient que la murette présente un éperon qui divise les flammes et évite les remous.

2° L'alimentation doit déboucher aussi haut que possible au-dessus du coup de feu et se produire d'une façon continue et régulière, pour éviter les contractions et dilatations brusques du métal.

3° Les tôles du coup de feu ne doivent jamais être cintrées en travers; elles seront de bonne qualité et leurs coutures seront consolidées au moyen de clouures à doubles rangées de rivets.

Recommandations générales. — La plupart des chaudières des usines métallurgiques sont disposées en batteries et communiquent entre elles par des prises de vapeur se greffant sur une conduite unique. De plus, elles sont en général situées dans des ateliers fréquentés par de nombreux ouvriers. Il en résulte que l'explosion d'une chaudière peut produire des accidents d'une gravité extrême. L'arrachement d'une partie de la conduite de vapeur déverse alors dans l'atelier la vapeur accumulée dans tous les générateurs voisins.

Cette cause de danger n'est pas spéciale aux chaudières verticales; M. Hanet-Cléry l'a signalée dans une ernière série de recommandations.

4° Il convient d'établir, autant que possible, les générateurs en dehors des ateliers, et en tout cas de les isoler les uns des autres par des clapets de retenue automatiques, greffés sur le tuyau de vapeur qui réunit chaque générateur à la conduite unique.

Ces clapets laissent, en fonctionnement normal, un libre passage à la vapeur. Ils se ferment automatiquement quand, pour une cause quelconque, la pression dans la conduite générale s'abaisse d'une façon anormale.

Explosion de Marnaval.

Rapport de M. Trautmann. — En 1883, un rapport (*) de M. l'ingénieur en chef Trautmann rend compte des causes de la catastrophe de Marnaval; la Commission centrale émet l'avis que tous les désordres, qui se sont présentés à Marnaval, étaient prévus dans le mémoire de M. Hanet-Cléry, et qu'il y a lieu d'insister sur les prudentes recommandations qui le terminent par une circulaire ministérielle les rappelant aux ingénieurs du service ordinaire, chargés à leur tour d'appeler sur ce point la sollicitude des chefs d'industrie (**).

Circulaire ministérielle du 13 février 1884.

Cette circulaire est envoyée, à la date du 13 février 1884 et dès le 10 novembre de la même année, la catastrophe d'Eurville, survenant à quelques kilomètres de Marnaval, et dans des conditions tout à fait analogues, vient démontrer l'inobservation des enseignements qui

(*) *Annales des mines*, IV, 249.
(**) Le rapport de M. Trautmann a été lui-même envoyé aux industriels, par les soins des préfets.

étaient cependant appuyés par des recommandations officielles réitérées et par un exemple désastreux tout voisin.

La Commission centrale considère comme un devoir impérieux d'étudier avec un soin tout spécial l'accident d'Eurville, afin d'éviter à l'avenir, autant que possible, le retour de semblables catastrophes ; une Sous-Commission est chargée d'en préparer l'examen approfondi et présente son rapport (*) dans la séance du 20 janvier 1885.

Accident d'Eurville. — Rapport de la Sous-Commission.

Il constate une fois de plus que l'accident d'Eurville n'apporte aucun enseignement technique nouveau; il ne fait que spécifier dans des circonstances particulièrement éclatantes et douloureuses, la nécessite urgente d'entourer les chaudières des usines métallurgiques de précautions spéciales, et notamment de celles qui ont été officiellement recommandées par l'Administration. Au point de vue technique, la question peut être considérée comme vidée par le rapport de M. Hanet-Cléry.

Au point de vue administratif, y a-t-il lieu de provoquer des mesures réglementaires nouvelles? La Sous-Commission et, à sa suite, la Commission centrale ont jugé qu'il convenait de laisser cours à la justice, saisie de l'affaire, et d'ouvrir une dernière enquête sur l'état des chaudières chauffées par les fours métallurgiques.

RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE DE 1885.

Les pièces relatives à cette enquête ont été transmises à la Commission centrale, à la date du 26 octobre

(*) *Annales des mines*, VII, 469.

dernier. Elles consistent en 1.580 fiches, dont le dépouillement donne les résultats suivants relatifs aux chaudières verticales (Voir tableau I, pages 26-27).

Nombre. — Il existe actuellement en France (ateliers des chemins de fer compris) 78 établissements métallurgiques, utilisant 805 chaudières verticales chauffées par les flammes perdues d'environ 840 fours. En 1876, M. Hanet-Cléry estimait à 720 le nombre des mêmes appareils.

Forme. — Les chaudières verticales simples sont au nombre de 537 (67 p. 100). On en compte 103 à deux corps ou à bouilleurs (13 p. 100), et 106 à tube intérieur, tubulaires ou multitubulaires (20 p. 100).

Timbre. — Le timbre réglementaire oscille autour d'une moyenne de 5 kilogrammes; 406 d'entre elles, soit 51 p. 100, sont timbrées à 5 kilogrammes et au-dessous; 399, soit 49 p. 100, portent un timbre supérieur à 5 kilogrammes.

Situation. — 689 chaudières, soit 86 p. 100, sont situées dans les ateliers.

Rampants tangentiels. — On n'en compte que 16 p. 100 (123) dont les rampants amènent les flammes tangentiellement; 682 sont munies de rampants normaux ou peu inclinés, dans un plan vertical, sur l'axe de l'appareil.

Murette réfractaire. — La murette réfractaire de protection existe dans 470 cas, soit 58 p. 100. Mais elle n'est séparée des tôles par un intervalle libre, c'est-à-dire tout à fait efficace, que dans 249 appareils (31 p. 100). Il y a donc 221 chaudières (27 p. 100) insuffisamment protégées, et 335 chaudières entièrement dépourvues de protection au coup de feu.

L'intervalle ménagé entre la murette et les tôles oscille entre des limites éloignées de 10 à 700 millimètres; la moyenne est de 50 millimètres.

Chambres d'élargissement. — Nous n'avons pas relevé un seul exemple de récupérateur à briques croisées, disposé sur le chemin du rampant. Les chaudières multitubulaires présentent en général une chambre d'élargissement; elles sont en fort petit nombre (3 p. 100).

Clapets de retenue. — Quant aux clapets de retenue automatiques sur la prise de vapeur, ils commencent à se répandre et on compte 122 générateurs (soit 16 p. 100) qui en sont munis isolément ou deux par deux.

Tels sont les résultats généraux qui se dégagent de l'enquête.

Statistique des accidents survenus aux chaudières verticales de 1865 *à* 1885 *inclusivement.* — Le tableau n° II présente l'état résumé des explosions de chaudières verticales chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques, de l'année 1878 inclusivement à ce jour. Rapproché du tableau similaire, inséré dans le rapport de M. Hanet-Cléry, il permet l'étude d'une période de vingt et un ans et donne lieu aux remarques suivantes :

Durant cette période, 13 accidents se sont produits et ont entraîné la mort de 103 personnes, des blessures à 164. Dans deux cas, la cause de l'explosion a été indépendante de la forme de la chaudière. Quatre d'entre eux sont dus au manque d'eau et témoignent des mauvais résultats donnés par les indicateurs du niveau de l'eau dans les chaudières verticales à grande hauteur.

Enfin, 7 accidents sont dus à la corrosion des tôles du coup de feu; dans quatre de ces derniers cas, les avaries se sont produites sous une murette réfractaire immédia-

tement placée sur les tôles. Dans trois autres, les tôles n'étaient protégées d'aucune façon.

Si l'on compare ces chiffres à ceux qui ressortent des statistiques dressées pour tous les appareils à vapeur en activité dans la France entière, la comparaison est vraiment écrasante au préjudice des chaudières verticales des forges.

Pour la France entière, la moyenne des six années 1878 à 1883 donne *par an* sur 80.000 chaudières et récipients en activité (chemins de fer et bateaux à vapeur compris) 29 accidents, 34 tués et 34 blessés. Il y a donc, en nombres ronds, 1 accident pour 2.750 appareils, 1 tué pour 2.350 appareils, 1 blessé pour 2.350 appareils.

L'emploi des chaudières verticales, durant 21 années, revèle en moyenne, *par an*, 1 accident pour 1.212 appareils, 1 tué pour 152 appareils, 1 blessé pour 96 appareils.

De tels chiffres se passent de commentaires, surtout si l'on considère que la moyenne générale applicable à toute la France aurait été encore plus faible, si l'on n'y avait intentionnellement compris les résultats dus aux chaudières verticales.

Ainsi, de 1878 à 1883, l'emploi des appareils à vapeur a amené la mort de 197 personnes et des blessures à 205 personnes. Les chaudières verticales, à elles seules, entrent dans le total pour 37 tués et 70 blessés ; et l'on a vu plus haut qu'elles ne représentent pas le 1/100e des appareils en activité dans toute la France.

Y a-t-il lieu à prescriptions réglementaires? — La conclusion à tirer des renseignements de l'enquête poursuivie en 1885 et des statistiques précédemment résumées, est que les chaudières verticales, chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques, constituent

des appareils particulièrement dangereux, lorsqu'elles ne sont pas établies suivant les règles formulées avec précision, dès 1878, dans le rapport de M. Hanet-Cléry. Comme la Sous-Commission le faisait ressortir en 1884, la question technique est absolument résolue et ne paraît prêter à aucune contestation.

Dans son rapport sur l'accident d'Eurville, la Sous-Commission spécifie que la seule question pendante est de savoir s'il y a lieu de compléter, à ce point de vue, les prescriptions réglementaires du décret du 30 avril 1880, ou de persister simplement dans la voie des conseils déjà officiellement portés à la connaissance des intéressés par la circulaire ministérielle du 13 février 1884 et de se confier à la répression judiciaire en cas d'accident.

A ce point de vue, la catastrophe d'Eurville, postérieure à la circulaire précitée, paraît féconde en renseignements.

D'une part, l'enquête de 1885 démontre que ni les chaudières d'Eurville, ni celles de Marnaval, ne fonctionnaient à cette date dans des conditions techniques satisfaisantes. A Marnaval, il n'existait qu'une murette réfractaire de protection adhérente aux tôles; à Eurville, le pisé réfractaire, également appliqué sur les tôles, ne dépassait pas le milieu de l'ouverture du rampant. Ainsi les conseils officiels sont restés inefficaces dans deux usines où cependant des catastrophes inoubliables ont eu lieu récemment (*).

D'autre part, les poursuites judiciaires, survenues après l'accident d'Eurville, ont abouti, en première instance et en appel, à un acquittement sur le chef d'homicide par imprudence. Un des considérants du jugement du tribunal correctionnel de Vassy, en date du 22 avril

(*) Cet état de choses est actuellement transformé.

1885, confirmé par un arrêt du 17 juin de la Cour d'appel de Dijon, mérite d'être cité intégralement :

« En ce qui touche le revêtement réfractaire, attendu que, si le défaut d'un revêtement réfractaire, destiné à protéger les tôles du coup de feu, est considéré comme la faute la plus lourde à reprocher au prévenu, il y a lieu de remarquer que cette mesure si importante n'a pas encore été prescrite aux propriétaires de chaudières verticales; que l'administration des mines, émue des graves accidents causés par l'explosion de chaudières verticales chauffées par la flamme des fours aux forges de Clairvaux en 1873, à celle de Commentry en 1874, a, en 1878 seulement, recommandé aux propriétaires de chaudières verticales l'établissement d'un revêtement en maçonnerie réfractaire, qu'elle a renouvelé ces sages conseils après l'explosion d'une chaudière verticale aux forges de Marnaval, *mais qu'elle n'a pas encore transformé ces recommandations en prescriptions obligatoires, probablement à cause des difficultés, sinon de l'impossibilité d'appliquer cette mesure aux chaudières verticales actuellement installées...* »

Cette interprétation des difficultés techniques qui se présentent dans la transformation des installations actuelles est sans doute erronée; mais le dilemme, posé dans les considérants cités ci-dessus, se présentera toujours à l'esprit des juges; car l'installation des dispositifs protecteurs ne supprime pas toute cause de danger et ne fait qu'en diminuer la probabilité; et, d'autre part, les chaudières dépourvues de protection, mais très soigneusement entretenues et très scrupuleusement conduites, peuvent résister aux effets de destruction inhérents à leur type.

Conclusions. — La Sous-Commission estime donc que les conseils officiels et les mesures répressives, après

accident, sont insuffisants et qu'il y a lieu d'exiger, dès à présent, de l'industrie un minimum de mesures préservatrices spéciales aux chaudières verticales chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques.

Le décret à intervenir ne viserait que celles de ces chaudières munies de rampants non tangentiels et, en outre, dépourvues de chambre d'élargissement.

Il exigerait l'établissement d'une murette de protection en maçonnerie réfractaire, disposée dans les carneaux en face du débouché des rampants. Cette murette devrait être distante d'au moins 50 millimètres des tôles voisines. Elle s'élèverait à environ 50 centimètres au-dessus du point de rencontre des génératrices supérieures des rampants, et s'étendrait, de part et d'autre, à 1/4 de circonférence de ces points, pour rendre le courant de flammes tangentiel.

Quant à la bonne disposition de l'alimentation, à la bonne qualité des tôles du coup de feu et à la consolidation de leurs joints, elles sont sans doute de toute façon désirables et recommandables; mais, d'une part, elles s'appliquent à tous les types de chaudières, et, d'autre part, elles paraissent rentrer dans les prescriptions de bonne construction et de bon entretien des appareils qu'aucun règlement ne peut prévoir minutieusement. En outre, l'obligation des doubles clouures entraînerait l'industrie à des dépenses vraiment considérables, et elle ne sera plus indispensable, lorsque les chaudières verticales à rampants, non tangentiels, seront préservées des coups de chalumeau qui dardent actuellement les flammes d'une façon directe contre les tôles du coup de feu.

Il reste à traiter la question des clapets automatiques disposés sur les prises de vapeur. Il est certain que lorsque plusieurs chaudières de grande capacité sont en communication directe et habituelle, l'explosion de l'une d'elles est singulièrement aggravée par la masse de va-

peur qui se déverse des autres chaudières, au moment où la conduite unique est disloquée. Cette cause d'aggravation dans les conséquences d'un accident, est surtout fâcheuse quand les chaudières sont situées dans les ateliers, et la Sous-Commission estime qu'il y a lieu d'y porter remède en exigeant l'établissement d'appareils qui ne sont ni coûteux, ni encombrants.

Mais la question n'est pas spéciale aux chaudières verticales et, pour cette raison, il convient d'en reporter l'examen à la suite des résultats de l'enquête de 1885, relative aux chaudières horizontales.

II. — CHAUDIÈRES HORIZONTALES.

L'enquête de 1885 a révélé l'existence en France (ateliers de chemins de fer compris) de 124 établissements métallurgiques, utilisant 775 chaudières horizontales chauffées par les flammes perdues d'environ 950 fours. (Voir tableau n° III, pages 30-31.)

Forme. — Les chaudières horizontales à corps cylindrique simple sont au nombre de 183 (24 p. 100). On en compte 512 (66 p. 100) à bouilleurs ou réchauffeurs et 80 (10 p. 100) tubulaires ou multitubulaires.

Timbre. — Le timbre réglementaire oscille autour de 5 kilogrammes. Il y en a 58 p. 100 timbrées à 5 kilogrammes et au-dessous et 42 p. 100 timbrées au-dessus de 5 kilogrammes.

Capacité.— La capacité varie dans les limites les plus étendues et atteint jusqu'à 30 mètres cubes. La moyenne est d'environ 10 mètres cubes.

Situation. — Comme pour les chaudières verticales,

le plus grand nombre, 626 (79 p. 100), est situé dans les ateliers.

Rampants. — Les rampants tangentiels sont ici les plus nombreux (85 p. 100), et cette disposition, jointe à la plus grande dimension du débouché dans les carneaux, contribue à expliquer l'immunité relative des chaudières horizontales chauffées par les flammes perdues.

Murs réfractaires de protection. — Il est fait usage de murs réfractaires, qui protègent les tôles contre l'arrivée directe du courant de flammes souvent très chaudes, pour 364 chaudières (47 p. 100); dans 219 cas, par une disposition défectueuse, la maçonnerie touche directement les tôles. Dans 145 cas, le mur réfractaire n'est pas jointif; la distance aux tôles est variable dans de très grandes limites, de 30 millimètres à $1^{m},600$.

Chambres d'élargissement. — Aucun récupérateur à briques croisées n'a été signalé; les chambres d'élargissement proprement dites sont également rares (64, soit 8 p. 100); mais souvent, en débouchant dans les carneaux, le rampant s'élargit et constitue un espace où les flammes peuvent se brasser.

Clapets de retenue. — On ne compte que 16 chaudières qui soient munies, soit isolément, soit par groupe de deux, d'un clapet de retenue automatique, disposé sur la prise de vapeur.

Quelques dispositions particulières méritent une mention. A *Commentry* (*Allier*), les chaudières à un seul ›ouilleur comprennent un carneau unique autour du ouilleur et sous la chaudière. Le rampant est tangentiel la chaudière et le coup de feu est garanti par une ›urte voûte en maçonnerie réfractaire qui touche la

première virole. Le premier cuissard est également protégé par un éperon en briques réfractaires. Capacité, 13 mètres cubes ; timbre, 6 kilogrammes.

L'usine de Tamaris, à Alais (Gard), possède deux types de chaudières horizontales à flammes perdues. Le premier consiste en chaudières cylindriques à un bouilleur, de 13 à 15 mètres cubes sur les fours à réchauffer et de 9 à 10 mètres sur les fours à puddler. Timbre $3^k,5$ à 4 kilogrammes. Chacune de ces chaudières surmonte un four. Le corps cylindrique de $1^m,40$ de diamètre est suspendu par des ailettes dans la maçonnerie ; le bouilleur, d'un diamètre de $1^m,20$, est séparé par une voûte en cloison du corps cylindrique, et repose sur des consoles en fonte. Le carneau l'entoure totalement ; le rampant vertical aboutit à une chambre de combustion située à l'arrière du bouilleur, et les flammes viennent d'abord frapper la voûte séparatrice des deux carneaux ; elles lèchent ensuite le bouilleur d'arrière en avant, et le corps cylindrique d'avant en arrière.

Un second type est tubulaire ; le rampant vertical amène les flammes dans une chambre extérieure en tôle, dont le coup de feu est armaturé, mais non protégé.

A Fraisans (Jura), une disposition très rationnelle a été adoptée sur 28 chaudières horizontales à un bouilleur, d'une capacité de $14^{mc},600$ (timbre 6 kilogrammes), qui sont situées dans le prolongement d'un four à réchauffer. Le rampant descend jusqu'au trou d'écoulement des laitiers, puis remonte vers le bouilleur dont le fond avant est préservé par un éperon en briques réfractaires qui occupe toute la hauteur du carneau. Le courant de flammes est ainsi divisé en deux parties qui lèchent tout le bouilleur, puis remontent à l'arrière sous la chaudière. L'éperon protecteur est accolé à un bouclier en fonte que des pattes rattachent au fond avant du bouilleur et qui maintient une distance libre de 50 millimètres.

Statistique des accidents de 1878 *à* 1885. — De 1878 à 1885, on a compté 3 accidents de chaudières (Voir tableau n° IV) horizontales, chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques, ayant causé la mort de 3 personnes et des blessures à 15 personnes.

Les causes de ces accidents ne sont pas particulières au système de chauffage employé; elles ont consisté, dans le premier cas, en un défaut de construction; dans le second, en un manque d'alimentation; enfin, dans le troisième, on a relevé de profondes corrosions extérieures dans une région emprisonnée dans la maçonnerie.

Dangers spéciaux des chaudières horizontales à flammes perdues. — En somme, les chaudières horizontales à flammes perdues paraissent, au premier abord, aussi exposées que les chaudières verticales au danger des coups de feu. Les statistiques d'accidents et la pratique démontrent cependant que le danger est ici beaucoup moins grand.

Les causes de cette anomalie apparente nous paraissent résulter du plus grand nombre de rampants tangentiels, de la fréquente existence d'un espace libre entre l'arrivée du rampant et le fond des bouilleurs ou du corps cylindrique; enfin de la possibilité d'éloigner le débouché de l'alimentation des points les plus chauffés de la chaudière.

Cependant il arrive assez fréquemment que les flammes viennent heurter, à la sortie du rampant, tout ou partie des fonds des bouilleurs ou du corps cylindrique, ou même, dans le cas de rampants normaux, une des viroles de ces appareils. Le plus souvent alors, ces parties exposées se trouvent protégées par des éperons ou des voûtes en matériaux réfractaires, et toutes les précautions recommandées pour les chaudières verticales sont applicables aux chaudières horizontales.

Conclusions. — La Sous-Commission estime donc que lorsque des parties de chaudières horizontales sont directement frappées par les flammes sortant du rampant, sans interposition d'un intervalle libre dont la section soit au moins double de celle du rampant et qui puisse jouer le rôle de chambre d'élargissement, il y a lieu d'exiger l'établissement d'une murette de protection, distante des tôles d'au moins 50 millimètres et rendant le courant de flammes tangentiel.

Quant à la question des clapets de retenue automatiques disposés sur les prises de vapeur, elle se présente ici sous le même aspect que pour les chaudières verticales; elle n'est d'ailleurs pas spéciale aux chaudières chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques et, si elle est prise en considération, elle doit faire l'objet d'une mesure générale à tous les groupes de générateurs à vapeur.

RÉSUMÉ GÉNÉRAL.

En résumé, la Sous-Commission a cherché à mettre en évidence la nécessité de rendre obligatoires : 1° l'emploi de clapets automatiques sur les prises de vapeur, lorsque plusieurs chaudières de grande capacité se greffent sur une conduite unique; 2° certaines prescriptions protectrices spéciales aux chaudières chauffées par les flammes perdues des fours métallurgiques.

Cette nécessité a paru ressortir du nombre considérable des accidents de certaine nature relevés durant une période de 21 ans, de l'extrême gravité que plusieurs d'entre eux ont présentée; des résultats insuffisants dus à l'initiative privée, enfin des appréciations erronées auxquelles a donné lieu l'emploi de conseils officiels pressants, mais non obligatoires.

La Commission centrale pensera sans aucun doute

qu'il faut se garder de multiplier outre mesure les prescriptions à intervenir, et qu'il convient, tout en les réduisant à un minimum nécessaire, de les énoncer dans des termes aussi généraux que possible, pour éviter de diminuer et l'initiative et la responsabilité privées.

I. *Clapets automatiques de vapeur.* — Les clapets automatiques sur les prises de vapeur devront être appliqués à tout groupe de générateurs placés à demeure.

Ils compléteront les mesures de précautions énumérées dans le titre II du décret du 30 avril 1880, et les termes des prescriptions à intervenir devront s'inspirer de la rédaction de ce titre.

Actuellement, toute chaudière de première catégorie doit être placée en dehors des ateliers surmontés d'étages. Aucune obligation spéciale n'est imposée aux groupes de générateurs établis dans les ateliers ou à proximité des ateliers non surmontés d'étages, mais fréquentés par les ouvriers autres que les chauffeurs et les mécaniciens.

C'est à ces derniers seulement que la Sous-Commission propose d'appliquer des clapets automatiques. L'enquête de 1885 montre que, pour un timbre moyen de 5 kilogrammes, la capacité maximum des chaudières de l'industrie ne dépasse pas 30 mètres cubes; ces chiffres correspondent à un produit, calculé suivant les termes de l'article 14 du décret du 30 avril 1880, de $30 \times 58 = 1.740$.

Toutes les fois que plusieurs chaudières, en communication, dépasseront ce produit, il conviendra qu'elles soient divisées en groupe dont le produit soit au plus égal à 1.740 et que chaque groupe soit muni d'un clapet, susceptible de l'isoler en cas d'accident.

lapets se fermant du dedans au dehors. — Cette act . efficace des clapets de retenue peut être obtenue de d rses manières. La plus simple consiste à les faire

fonctionner ***du dedans au dehors*** (*), de telle sorte que, lorsque la pression baisse brusquement dans la conduite générale, chaque groupe de générateurs soit automatiquement isolé. Dans ce premier système, l'explosion d'un groupe, arrachant son clapet de retenue et même une partie de la conduite générale, laisse intact le système de protection; tous les autres groupes sont fermés brusquement et s'isolent ainsi des parties arrachées.

Clapets se fermant du dehors au dedans. — Un second emploi consiste à éloigner la conduite générale des générateurs et à placer les clapets se fermant *du dehors au dedans*, à l'insertion même des tuyaux adducteurs de vapeur sur la conduite générale. En cas d'accident, le groupe seul qui s'est avarié se trouve alors isolé du reste de l'ensemble, à condition que l'arrachement ne se soit pas propagé jusqu'à l'extrémité du tuyau adducteur de vapeur. Ce second système présente évidemment moins de garanties de sécurité que le premier, mais il est plus commode, en fonctionnement courant, car il égalise automatiquement la pression des divers générateurs accouplés. Lorsque la pression de l'un d'eux est trop basse, son clapet se ferme et lui permet de regagner sans dépense de vapeur la chaleur qui lui manque, tandis que dans le premier système, une chaudière à pression abaissée sert pour ainsi dire de condenseur; il faut en outre éviter les fermetures intempestives.

Nous devons à M. l'Ingénieur en chef Delafond des renseignements circonstanciés sur les clapets automatiques de retenue qui fonctionnent au Creusot : ils sont du second système et consistent en un clapet libre, s'ou-

---

(*) Le *Bulletin de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur*, pour l'année 1884, contient une description des clapets automatiques imaginés par MM. Hirsch et J. Farcot, II, 60.—Voir également le dispositif de MM. Lethuiller et Pinel, etc.

vrant de haut en bas, et venant simplement s'appuyer sur la vis d'un volant à main qui permet de les caler en cas de besoin. Situés à l'insertion du tuyau adducteur sur la conduite générale, ils sont assez éloignés des groupes de générateurs pour que leur arrachement ne soit pas probable, en cas d'accident.

M. l'ingénieur en chef Perrin nous a transmis, sur les clapets des forges de Saint-Nazaire, des renseignements qui montrent que leur installation est tout à fait analogue à celle du Creusot.

Clapets se fermant dans les deux sens. — Enfin, un troisième système, réunissant les avantages propres à chacun des deux premiers, mais pouvant comporter également des fermetures intempestives, consisterait à faire usage d'un clapet automatique pouvant se fermer dans les deux sens; une disposition récemment imaginée par M. le garde-mines Labeyrie est en ce moment à l'étude et paraît remplir ce but avantageux (*).

Il ne nous paraît pas indispensable de paralyser l'initiative privée en recommandant une disposition spéciale des clapets de retenue; il semble suffisant d'exiger qu'ils remplissent *efficacement* le but proposé.

II. *Murettes de protection.* — Conformément aux conclusions qui terminent les deux premières parties de ce rapport, il est possible de réunir, dans une seule rédaction, les prescriptions spéciales que paraissent exiger les chaudières verticales et horizontales, chauffées par les flammes perdues de fours métallurgiques.

Ces prescriptions, utiles dans tous les cas, ne seraient obligatoires que pour les appareils dans lesquels les rampants, qui amènent les flammes des fours, ne projet-

(*) Un de ces clapets, construit par M. Dupuch, a été récemment essayé dans les anciens ateliers Cail.

tent pas tout le courant de gaz chauds tangentiellement aux surfaces extérieures des tôles.

Alors, il y a lieu d'exiger, en face des rampants, l'établissement d'une murette de protection en matériaux réfractaires, distante des tôles d'au moins 50 millimètres, et suffisamment étendue dans tous les sens, pour que les courants de flammes, qui la débordent, aient pris des directions tangentes aux surfaces des tôles voisines.

III. *Dispositions générales et transitoires.* — Il convient de réserver à M. le Ministre des travaux publics, dans les formes prévues par l'article 35 du décret du 30 avril 1880, le droit d'accorder dispense de tout ou partie des prescriptions du nouveau règlement, dans les cas où, à raison de la forme, de la dimension ou de la disposition des appareils, il serait reconnu que cette dispense ne peut avoir d'inconvénient; cette tolérance pourra être appliquée notamment dans les cas exceptionnels où les rampants déversent le courant de gaz chauds, préalablement à la rencontre du métal, dans des chambres de dimensions et de dispositions convenables.

Les dispositions prescrites par le nouveau règlement ne sont ni très coûteuses, ni très longues à établir; mais elles exigent le chômage des chaudières auxquelles elles seraient appliquées, et il convient de stipuler un délai qui permette d'utiliser, à ce point de vue, les chômages habituels pour réparation et entretien des chaudières déjà déclarées.

Un délai de six mois paraît d'ailleurs suffisant pour remplir ce but (*).

(*) La Commission centrale des machines à vapeur a approuvé, dans sa séance du 4 février 1886, les conclusions de ce rapport, et le décret du 29 juin 1886 en a sanctionné les principales indications. (Voir *Partie administrative*, p. 199.)

TABLEAUX ANNEXES

TABLEAU N° I. — CHAUDIÈRES VERTICALES DE PREMIÈRE CAT

NUMÉROS D'ORDRE	DÉPARTEMENTS	NOMBRE d'établissements	NOMBRE TOTAL de chaudières	FORME DES CHAUDIÈRES: cylindriques simples	FORME DES CHAUDIÈRES: à bouilleurs ou à 2 corps	FORME DES CHAUDIÈRES: à tubes intérieurs tubulaires, multitubulaires	TIMBRE: 5 kilogr. et au-dessous	TIMBRE: au-dessus de 5 kilogr.	SITU: dans les ateliers
1	Allier	2	39	31	8	»	»	39	18
2	Ardennes	2	6	»	»	6	»	6	1
3	Ariége	1	27	7	2	18	»	27	11
4	Aveyron	1	13	13	»	»	13	»	13
5	Bouches-du-Rhône	3	7	2	»	5	2	5	7
6	Côte-d'Or	1	13	13	»	»	»	13	13
7	Doubs	1	1	»	»	1	»	1	1
8	Gard	1	17	17	»	»	11	6	17
9	Garonne (Haute-)	1	2	2	»	»	»	2	2
10	Isère	3	16	15	»	1	14	2	10
11	Landes	1	1	»	1	»	»	1	1
12	Loire	25	288	210	70	8	99	189	270
13	Loire-Inférieure	1	19	1	17	1	»	19	19
14	Maine-et-Loire	1	1	»	»	1	»	1	1
15	Marne (Haute-)	3	9	9	»	»	1	8	9
16	Meurthe-et-Moselle	4	49	38	»	11	28	21	21
17	Meuse	1	4	4	»	»	»	4	4
18	Morbihan	1	1	»	»	1	»	1	1
19	Nièvre	3	27	20	»	7	10	17	27
20	Nord	7	115	34	»	81	97	18	103
21	Oise	1	2	2	»	»	2	»	2
22	Saône-et-Loire	2	122	108	5	9	119	3	132
23	Seine	3	10	8	»	2	8	2	4
24	Seine-Inférieure	1	1	1	»	»	»	1	1
25	Tarn	1	2	2	»	»	1	1	2
26	Var	1	1	»	»	1	1	»	1
	Total pour les départements	72	793	537	103	153	406	387	681
	Chemins de fer du Nord	2	3	»	»	3	»	3	2
	— P.-L.-M.	2	7	»	»	7	»	7	5
	— de l'Ouest	1	1	»	»	1	»	1	1
	— d'Orléans	1	1	»	»	1	»	1	»
	Total des chemins de fer	6	12	»	»	12	»	12	8
	Total général	78	805	537	103	165	406	399	689
	Proportion p. 100	»	100	67	13	20	51	49	85

CHAUFFÉES PAR LES FLAMMES PERDUES DES FOYERS MÉTALLURGIQUES.

CHAUFFÉES		A RAMPANTS		A CARNEAUX CLOISONNÉS	MUNIES D'UNE MURETTE RÉFRACTAIRE PROTECTRICE							MUNIES D'UNE CHAMBRE de combustion	MUNIES DE CLAPETS automatiques sur la prise de vapeur
par un seul four	par plusieurs fours	tangentiels	normaux		Total	Murette touchant les tôles	Murette distante	Principales distances en commençant par les plus habituellement employées					
39	»	»	39	»	39	»	39	0^m,080	0^m,050	»	»	»	»
1	5	6	»	5	»	»	»	»	»	»	»	1	»
18	9	»	27	9	27	27	»	»	»	»	»	»	»
13	»	»	13	»	13	»	13	0^m,030	»	»	»	»	»
7	»	»	7	»	7	7	»	»	»	»	»	»	»
12	1	12	1	1	4	»	4	0^m,050	0^m,100	»	»	»	»
1	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
17	»	»	17	»	17	»	17	0^m,050	»	»	»	»	»
2	»	2	»	»	2	2	»	»	»	»	»	»	»
4	12	3	13	12	7	5	2	0^m,010	»	»	»	»	»
1	»	»	1	»	1	»	1	0^m,700	»	»	»	»	»
257	31	23	265	79	158	62	96	0^m,030	0^m,015	0^m,080	0^m,100	3	»
15	4	»	19	4	19	»	19	0^m,050	»	»	»	»	10
1	»	»	1	»	1	1	»	»	»	»	»	»	»
1	8	1	8	8	6	6	»	»	»	»	»	»	»
10	9	28	21	9	49	21	28	0^m,060	»	»	»	»	»
4	»	»	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	1	»	1	1	1	1	»	»	»	»	»	»	»
17	10	14	13	8	17	17	»	»	»	»	»	7	»
40	75	24	91	75	34	17	17	0^m,030	0^m,400	0^m,550	»	3	»
2	»	»	2	»	2	»	2	0^m,050	»	»	»	»	»
122	»	8	114	5	49	49	»	»	»	»	»	»	112
10	»	»	10	»	10	2	8	0^m,300	0^m,200	»	»	»	»
1	»	»	1	»	1	»	1	0^m,050	»	»	»	»	»
»	2	»	2	2	2	»	2	0^m,080	»	»	»	»	»
1	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	
[illegible]	167	123	670	218	466	217	249					14	122
3	»	»	3	»	»	»	»	»	»	»	»	3	»
7	»	»	7	»	3	3	»	»	»	»	»	7	»
1	»	»	1	»	1	1	»	»	»	»	»	1	»
1	»	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
[illegible]	»	»	12	»	4	4	»					11	»
[illegible]	167	123	682	218	470	221	249	»	»	»	»	25	122
[illegible]	21	16	84	27	58	27	31	Moyenne 0^m.050				3	16

TABLEAU N° II.

ÉTAT RÉSUMÉ DES EXPLOSIONS DE CHAUDIÈRES VERTICALES CHAUFFÉES PAR LES FLAMMES PERDUES DES FOURS MÉTALLURGIQUES.

(De 1878 à 1885 inclusivement.)

DATE de l'explosion	ÉTABLISSEMENT où a eu lieu l'explosion	NATURE du four alimentant	DATE de la dernière épreuve	CIRCONSTANCES et causes probables de l'accident	NOMBRE de victimes	
					Tués	Blessés
12 juillet 1880	Forges et laminoirs d'Aubervilliers (Seine).	Un four à réchauffer.	1880	Chaudière annulaire à tube intérieur de 0^m 65 de diamètre et 0^m,008 d'épaisseur. Le tube s'est fendu et aplati. Vice de construction ?	»	»
11 janv. 1882	Atelier de forges au Havre (Seine-Infér.)	Un four à réchauffer.	1880	Chaudière annulaire à tube intérieur de 0^m,72 de diamètre et 0^m,010 d'épaisseur, revêtue en briques sur 3 mètres de hauteur à la base et 2^m,50 à la partie supérieure. Le tube s'est déchiré à la seconde virole en montant; usure de la tôle, réduite à 0^m,006	7	1
13 déc. 1882	Forges d'Ivry (Seine).	Un four à réchauffer.	?	Chaudière cylindrique simple; sa partie supérieure s'est déchirée. Manque d'eau	»	1
31 mars 1883	Forges à Marnaval.	Trois fours à puddler.	1882	Chaudière cylindrique simple; la chambre de vapeur est seule garantie par un revêtement de briques. A partir de 2^m,20 au-dessus de la base, la chaudière s'est divisée en nombreux fragments. Affaiblissement de la tôle du coup de feu, non protégée	30	61
20 août 1883	Forges à Chambon-Feugerolles (Loire).	Un four à puddler.	1882	Chaudière cylindrique simple, protégée au coup de feu par une enveloppe de briques. La 3ᵉ virole s'est détachée et déchirée. Manque d'eau	»	7
10 nov. 1884	Forges d'Eurville (Haute-Marne).	Quatre fours à puddler.	1879	Chaudière cylindrique simple; tôle du coup de feu non protégée. La 2ᵉ virole, comprenant les tôles du coup de feu, s'est avariée rapidement et s'est déchirée. Dispositions vicieuses	22	33
					59	103

RÉSUMÉ DES CAUSES D'ACCIDENTS SURVENUES AUX CHAUDIÈRES VERTICALES CHAUFFÉES PAR LES FLAMMES PERDUES DES FOURS MÉTALLURGIQUES.

(De 1865 à 1885 inclusivement.)

[Voir le Rapport de M. H. Cléry, de 1865 à 1877.]

NOMBRE d'accidents	CAUSES	TUÉS	BLESSÉS
2	Cause indépendante de la forme (froid, mauvaise construction du générateur).	»	»
4	Manque d'eau.	»	23
7	Corrosion des tôles du coup de feu :		
	1° — 4 sous une murette réfractaire appliquée sur les tôles.	47	42
	2° — 3 Les tôles n'étant protégées d'aucune façon. . .	56	99
13	Sur 700 à 800 chaudières. Totaux.	103	164

TABLEAU N° III

TABLEAU N° III. — CHAUDIÈRES HORIZONTALES CHAUFFÉ

NUMÉROS D'ORDRE	DÉPARTEMENTS	NOMBRE d'établissements	NOMBRE TOTAL de chaudières	FORME DES CHAUDIÈRES			TIMBRE		SITUATION	
				cylindriques simples	à bouilleurs à réchauffeurs à 2 corps	à foyer intérieur tubulaires, multitubulaires	5 kilogr. et au-dessous	au-dessus de 5 kilogr.	dans les ateliers	hors des ateliers
1	Aisne	1	4	»	4	»	4	»	4	»
2	Allier	2	14	»	14	»	»	14	2	12
3	Ardennes	21	91	4	82	5	28	63	65	26
4	Ariége	1	7	»	»	7	»	7	7	»
5	Aube	2	4	4	»	»	»	4	4	»
6	Aveyron	2	31	»	31	»	31	»	25	6
7	Côte-d'Or	1	8	»	4	4	»	8	8	»
8	Côtes-du-Nord	1	4	»	3	1	2	2	4	»
9	Dordogne	1	3	»	3	»	3	»	2	1
10	Doubs	3	14	»	14	»	4	10	14	»
11	Eure	1	1	»	»	1	1	»	1	»
12	Gard	2	37	»	34	3	31	3	27	10
13	Isère	2	9	»	8	1	8	1	6	3
14	Jura	1	28	»	28	»	»	28	28	»
15	Loire	14	41	5	21	15	24	17	39	2
16	Loire-Inférieure	1	7	1	6	»	7	»	7	»
17	Maine-et-Loire	2	2	»	1	1	1	1	»	2
18	Marne (Haute-)	12	68	»	59	9	15	53	68	»
19	Meurthe-et-Moselle	5	26	1	25	»	7	19	26	»
20	Meuse	4	19	»	17	2	16	3	17	2
21	Morbihan	1	4	»	4	»	4	»	4	»
22	Nièvre	3	10	3	7	»	8	2	4	6
23	Nord	14	231	156	61	14	184	47	160	71
24	Oise	3	42	»	41	1	33	9	42	»
25	Saône-et-Loire	2	5	»	4	1	4	1	5	»
26	Seine	11	30	6	22	2	9	21	27	3
27	Seine-Inférieure	1	3	3	»	»	3	»	3	»
28	Seine-et-Oise	1	3	»	3	»	»	3	3	»
29	Somme	2	8	»	8	»	2	6	8	»
30	Yonne	1	11	»	»	11	11	»	11	»
	Total pour les départements	118	765	183	504	78	443	322	621	144
	Chemins de fer du Nord	1	1	»	»	1	»	1	»	1
	— de P.-L.-M.	2	5	»	5	»	3	2	2	3
	— d'Orléans	1	1	»	»	1	»	1	1	»
	— de l'Est	1	1	»	1	»	»	1	1	»
	— du Midi	1	2	»	2	»	2	»	1	1
	Total des chemins de fer	6	10	»	8	2	5	5	5	5
	Total général	124	775	183	512	80	448	327	626	149
	Proportion p. 100	»	100	24	66	10	58	42	79	21

R LES FLAMMES PERDUES DES FOYERS MÉTALLURGIQUES.

CHAUFFÉES		A RAMPANTS		A CARNEAUX CLOISONNÉS	MUNIE D'UNE MURETTE RÉFRACTAIRE PROTECTRICE							MUNIES D'UNE CHAMBRE de combustion	MUNIES DE CLAPETS automatiques sur la prise de vapeur
par un seul four	par plusieurs fours	tangentiels	normaux		Total	Murette touchant les tôles	Murette distante	Principales distances en commençant par les plus usitées					
4	»	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
14	»	14	»	»	12	12	»	»	»	»	»	»	»
49	42	91	»	35	26	23	3	0m,030	»	»	»	»	»
7	»	7	»	»	7	7	»	»	»	»	»	»	»
2	2	4	»	2	4	»	4	0m,150	0m,200	»	»	»	»
31	»	31	»	»	29	13	16	0m,070	0m,250	0m,030	»	12	12
7	1	8	»	»	4	4	»	»	»	»	»	»	»
3	1	4	»	1	3	3	»	»	»	»	»	»	»
1	2	3	1	2	3	»	3	0m,500	0m,800	»	»	»	»
12	2	14	»	»	1	1	»	»	»	»	»	»	»
»	1	»	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»
37	»	»	37	»	»	»	»	»	»	»	»	37	»
8	1	5	4	1	»	»	»	»	»	»	»	1	»
28	»	28	»	»	28	»	28	0m,050	»	»	»	»	»
41	»	39	2	»	9	8	1	0m,500	»	»	»	2	»
4	3	7	»	3	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1	1	2	»	»	2	»	2	0m,050	0m,100	»	»	»	»
44	24	68	»	24	»	»	»	»	»	»	»	2	»
26	»	26	»	»	17	7	10	0m,050	0m,060	»	»	»	»
16	3	19	»	3	12	12	»	»	»	»	»	»	»
1	3	4	»	3	1	1	»	»	»	»	»	»	»
5	5	4	6	5	2	2	»	»	»	»	»	»	»
158	73	230	1	73	132	109	23	0m,350	0m,600	0m,400	»	1	»
38	4	2	40	4	39	»	39	0m,100	»	»	»	1	»
4	1	4	1	1	1	1	»	»	»	»	»	»	»
30	»	7	23	»	23	15	8	0m,400	0m,160	0m,030	»	»	4
3	»	3	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
3	»	»	3	»	3	»	3	0m,100	»	»	»	»	»
6	2	8	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
11	»	11	»	»	»	»	»	»	»	»	»	8	»
594	171	646	119	158	358	218	140					64	16
1	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
5	»	5	»	»	3	»	3	0,425	»	»	»	»	»
1	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1	»	1	»	»	1	1	»	»	»	»	»	»	»
2	»	2	»	»	2	»	2	1,160	1,600	»	»	»	»
10	»	10	»	»	6	1	5					»	»
604	171	656	119	158	364	219	145	Très variables				64	16
77	23	85	15	21	47	27	20					8	2

TABLEAU N° IV.

ÉTAT RÉSUMÉ DES EXPLOSIONS DE CHAUDIÈRES HORIZONTALES CHAUFFÉES PAR LES FLAMMES PERDUES DES FOURS MÉTALLURGIQUES

(De 1878 à 1885 inclusivement.)

DATE de l'explosion	ÉTABLISSEMENT où a eu lieu l'explosion	NATURE du four alimentant	DATE de la dernière épreuve	CIRCONSTANCES et causes probables de l'accident	NOMBRE de victimes	
					Tués	Blessés
21 févr. 1881	Forge à Creil (Oise).	Trois fours à puddler.	?	Chaudière cylindrique avec deux bouilleurs à fond de fonte. Fuite à la tête d'un bouilleur, puis projection de ce fond ; défaut dans le joint ? cassure ancienne dans la fonte.	»	3
23 mai 1881	Val d'Osne (Ardennes).	Un four à souder.	1877	Chaudière cylindrique à bouilleur. Déchirure du corps cylindrique. Manque d'eau	»	4
19 oct. 1882	Forges à Ferrière-la-Grande (Nord).	2 fours de chaufferie.	?	Chaudière cylindrique à deux bouilleurs. Un des bouilleurs s'est déchiré de son extrémité à la première communication. Profondes corrosions extérieures dans une région emprisonnée dans la maçonnerie.	3	8
Total : 3 accidents.					3	15

N° 49

RAPPORT

SUR

L'EXPLOSION DE LA CHAUDIÈRE DU BATEAU A VAPEUR

Le TAPE-DUR

A L'ÉCLUSE DE BOUGIVAL (SEINE-ET-OISE)

Par M. A. MICHEL-LÉVY, ingénieur en chef des mines.

Le 19 mai 1886, la chaudière du bateau à vapeur remorqueur le *Tape-Dur* a fait explosion en amont de l'écluse de Bougival. Deux ouvriers ont été tués, un grièvement blessé, un quatrième a reçu des blessures légères. Les dégâts matériels sont importants : le bateau a été mis en pièces.

M. l'ingénieur des mines Léon Lévy, délégué par la Commission de surveillance locale, a rendu compte de cet accident.

Description du bateau. — Le bateau à aubes le *Tape-Dur*, appartenant à MM. Froidure, Commartin et Lenneru, possède une machine de 80 chevaux, placée à l'arrière, et desservie par une chaudière, du type de celles des locomotives, assise à l'avant, à 60 centimètres au-dessus de la cale, sur des longerons en fer, formant châssis. Le foyer était situé à l'avant, et le mécanicien était ainsi

séparé des chauffeurs par toute la longueur de la chaudière.

Description de la chaudière. — L'enveloppe de la boite à feu qui, en se déchirant, a produit l'explosion, était parallélipipédique à sa partie inférieure, et surmontée d'un berceau cylindrique portant un dôme de vapeur (Pl. 33, *fig.* 1, 2).

Les dimensions principales étaient les suivantes :

Longueur	1m,496
Largeur	1 ,496
Hauteur sous clef	2 ,150
Épaisseur des tôles de fer, parois planes	17mm
Id. berceau	18

La boite à feu, de même forme, avait une épaisseur de 18 millimètres.

Le corps cylindrique, d'une longueur de 3 mètres et d'un diamètre de 1m,232, était composé de tôles de 16 millimètres. Il contenait 99 tubes à fumée en fer.

La capacité totale était de 4m³,770; la surface de chauffe de 75 mètres carrés, le timbre de 9 kilogrammes.

Enveloppe de la boîte à feu. — L'enveloppe de la boite à feu était composée de cinq feuilles de tôle, quatre planes, une en berceau. Les feuilles planes, avant et arrière, étaient embouties et rivées par une rivure simple aux feuilles planes latérales et au berceau.

Cette enveloppe et le foyer étaient fixés à la partie inférieure sur un cadre en fer forgé de 8 centimètres sur 8 centimètres, au moyen de vis taraudées et rivées, présentant un diamètre au noyau de 18 millimètres avec écartement moyen d'axe en axe de 6 centimètres. C'est la seule clouure intéressée par l'explosion.

Consolidation des faces planes et du ciel du foyer. —

Des entretoises pleines en cuivre, d'un diamètre au noyau de 20 millimètres, et écartées d'axe en axe de 20 centimètres, reliaient les parois planes en regard.

La devanture de l'enveloppe extérieure au-dessus de la partie entretoisée était renforcée par six fers à cornières de 17 centimètres sur 7 centimètres, d'une épaisseur de 12 millimètres, disposés verticalement.

Une série d'armatures analogues consolidait le ciel du foyer, parallèlement à ses génératrices.

Le système de consolidation était complété par deux tirants en fer reliant la face avant supérieure de l'enveloppe à la face arrière, et par un troisième tirant parallèle, venant se fixer à une oreille portée par le corps cylindrique.

Appareils de sûreté. — Les appareils de sûreté réglementaires étaient au complet; ils ont été brisés ou perdus, lors de l'explosion.

L'alimentation était assurée par deux pompes mues par la machine, et par un Giffard; elle débouchait près de la boîte à fumée.

Origine. Épreuves. Réparations. — La chaudière, construite, en 1879, chez M. Lanternois, à Bercy, a été primitivement timbrée à 7 kilogrammes. Puis elle a subi ultérieurement plusieurs épreuves pour le timbre de 9 kilogrammes, notamment en juin 1885, à la suite d'un remplacement de tubes à fumée, opéré dans les anciens établissements Cail.

Le 14 novembre 1885, une nouvelle épreuve de cette chaudière fut effectuée chez M. Lapeyre, constructeur à Argenteuil; une pièce en cuivre rouge de 25 centimètres sur 22 centimètres avait été fixée au ciel du foyer au moyen de vis en cuivre rouge taraudées et rivées. M. Lapeyre avait en outre doublé le cadre inférieur, dans l'angle

avant de droite de l'enveloppe du foyer, par une semelle en fer, fixée par des vis taraudées et rivées. C'est à cette époque également que le troisième tirant fut ajouté.

L'autorisation de naviguer datait du 16 août 1883 ; la dernière visite annuelle de la Commission de surveillance de la Seine avait été passée le 3 avril 1886 ; le mécanicien était dûment commissionné.

Circonstances qui ont accompagné l'explosion. — Le 19 mai 1886, vers huit heures du matin, le *Tape-Dur* quittait Poissy; il stationna de neuf heures à dix heures et demie devant l'écluse de Bougival, et mit une demi-heure à la franchir. Il remorquait deux lourds chalands remplis de sable.

L'équipage se composait du capitaine, du second, d'un mousse, du mécanicien, du chauffeur et d'un aide-chauffeur.

Le mécanicien et le premier chauffeur avaient quitté le bateau pendant l'éclusée, laissant la chaudière sous la surveillance de l'aide-chauffeur qui a été tué.

A leur retour, le mécanicien se rendit au condenseur qui fonctionnait mal, et le chauffeur à la machine. Aucun d'eux n'a donc surveillé les appareils de sûreté de la chaudière à partir de dix heures.

Le bateau venait de quitter le chenal de l'écluse et avait fait 20 tours de roues, puis stoppé 2 à 3 minutes ; le capitaine se penchait sur son porte-voix pour crier : « en avant ! », quand, à onze heures, l'explosion se produisit.

Toute la bande de tôle constituant les faces latérales et le berceau de l'enveloppe du foyer a été lancée à 80 mètres de distance du bâbord, sur la pointe de l'île de Bougival, en même temps que le cadavre du mousse.

De nombreux débris étaient projetés en tous sens ; le reste de la chaudière, à peu près intact, se déversait à

tribord, et le bateau coulait, entraînant le cadavre de l'aide-chauffeur.

Le capitaine et le chauffeur purent être sauvés, malgré leurs blessures assez graves.

Le mécanicien et le second n'avaient reçu que des contusions sans gravité.

Examen des tôles rompues. — Comme on l'a vu plus haut, la bande de tôle composée des faces latérales et du berceau de l'enveloppe de la boîte à feu, a été entièrement détachée du reste de la chaudière et projetée toute développée (Pl. 33, *fig.* 3).

Elle s'est rompue suivant la ligne des centres des vis qui la reliaient au cadre inférieur. Seuls deux lambeaux sont restés adhérents à ce cadre, l'un au coin avant de droite, au-dessus de la semelle ajoutée lors de la dernière réparation, l'autre au coin arrière de gauche.

Puis la déchirure abandonne les faces latérales et suit avec une régularité complète le dos de la partie emboutie des faces avant et arrière (*fig.* 4 à 6).

Ces dernières, restées adhérentes à la chaudière, ont été fortement repoussées à leurs parties supérieures; une partie de leurs entretoises et les trois tirants ont été rompus; l'écartement est surtout marqué à gauche, du côté opposé à la direction prise par le lambeau projeté.

Le foyer est à peu près intact; cependant les faces latérales présentent des traces d'enfoncement, surtout à gauche, où la profondeur de la déformation est de 6 à 7 centimètres.

Détails de l'arrachement. — L'arrachement s'est produit le long du cadre inférieur avec une netteté extraordinaire; toutes les têtes des vis rivetées sont rasées par moitié, au niveau de la ligne de rupture.

Les entretoises latérales sont rompues assez irréguliè-

rement. Une d'entre elles à droite, cinq groupées à côté l'une de l'autre à gauche et en bas vers l'arrière, présentent sur leurs cassures des traces de tartre qui prouvent que leur rupture est antérieure à l'explosion (*fig.* 6). Les autres présentaient des cassures vives et nettes.

C'est dans la partie de la face latérale gauche du foyer, correspondant aux cinq entretoises antérieurement rompues, que s'est produit l'enfoncement maximum signalé plus haut.

Les tôles ont partout conservé leur épaisseur normale; la dichirure à l'avant est plus vive et moins étirée qu'à l'arrière.

Essais des tôles. — M. Léon Lévy a fait essayer, dans les ateliers des chemins de fer de l'Est, deux barreaux (d'une longueur utile de 10 centimètres), prélevés dans le berceau de l'enveloppe extérieure.

	Sens du laminage.	En travers.
Charge de rupture par millimètre carré.	35^k	$29^k,3$
Allongement proportionnel p. 100. . . .	19 p. 100	15 p. 100

Les résultats obtenus, quoique peu nombreux, indiquent une tôle de très bonne qualité.

Conclusions de l'Ingénieur ordinaire. — En terminant, M. Léon Lévy croit devoir discuter l'hypothèse d'un défaut d'alimentation ; M. le garde-mines Cuvillier avait appelé son attention sur la déposition de plusieurs témoins qui ont constaté que le fragment projeté était resté brûlant pendant plusieurs minutes et présentait des taches violacées, rappelant celles que produisent les coups de feu.

M. Léon Lévy rejette, à juste titre, cette hypothèse ; le ciel du foyer est intact, et aucune des circonstances de l'explosion ne permet de supposer que le niveau de l'eau s'est abaissé outre mesure avant l'accident.

L'hypothèse d'un excès de pression était beaucoup plus plausible ; les soupapes de sûreté n'ont pas été retrouvées ; mais les survivants et l'un des propriétaires, M. Commartin, nient absolument toute surcharge intentionnelle ; pour eux, la pression au moment de l'accident ne devait pas dépasser 8 kilogrammes.

Il est constant que les joints, le long du cadre inférieur, fuyaient habituellement. Le mécanicien a même signalé cette avarie, au départ, à M. Commartin, qui lui aurait répondu qu'on la corrigerait à l'arrivée à Paris. M. Léon Lévy fait en outre remarquer que les entretoises étaient trop faibles et trop espacées ; aux ateliers des chemins de fer de l'Est, et pour des pressions analogues, on ne les espace que de 10 centimètres et on leur donne un diamètre de 25 millimètres, tandis que dans l'espèce, ces deux dimensions étaient respectivement de 20 centimètres et de 20 millimètres. Enfin, le fait capital, révélé par l'enquête, consiste dans la rupture antérieure de cinq de ces entretoises, juxtaposées en ovale, et isolant des parties planes de grandes dimensions, susceptibles de déformations permanentes.

Discutant ces diverses causes d'affaiblissement de la chaudière, M. Léon Lévy remarque que le coefficient d'affaiblissement de la tôle, le long de la clouure au cadre inférieur, n'avait rien d'exagéré (diamètre des vis 10 millimètres, espacement 60 millimètres) et n'atteignait que le rapport de 1 à $\left(1 - \frac{1}{3,3}\right)$ ou 1:0,70.

Mais il estime que les entretoises étaient primitivement trop faibles et trop espacées, et il rapporte surtout l'accident au défaut de surveillance et d'entretien qui a permis à cinq de ces entretoises de se rompre antérieurement à l'accident.

Pour lui, la déchirure a dû commencer à gauche, près de ce point faible, dans la partie emboutie arrière ; et

ce fait est confirmé par la projection en sens opposé du fragment détaché et par la direction des fragments d'entretoises encore adhérents au foyer.

Résumé. — M. Léon Lévy n'estime pas que le vice de construction, relevé plus haut, constitue une faute lourde, susceptible d'amener des poursuites correctionnelles contre le constructeur ; en effet, la chaudière date de plus de sept ans, et, de plus, elle n'avait été éprouvée que pour une pression de 7 kilogrammes à l'origine.

Mais il y a lieu de relever l'insuffisance des visites intérieures de la chaudière, prescrites par le décret du 9 avril 1883, et, en outre, de recommander au constructeur, M. Lanternois, d'augmenter le diamètre et de diminuer l'espacement des entretoises destinées à consolider les parois planes de ses chaudières.

Avis du président de la Commission. — M. l'ingénieur en chef des ponts et chaussées Caméré, président de la Commission de surveillance de Mantes, adopte cet avis.

Avis du Rapporteur. — Le rapport très complet de M. l'ingénieur ordinaire Léon Lévy met en évidence la principale cause d'affaiblissement qu'avait subie la chaudière, qui a fait explosion : la rupture antérieure de cinq entretoises juxtaposées, sur la face latérale gauche de l'enveloppe du foyer, avait isolé une surface plane en forme de trapèze, dont les deux bases avaient respectivement 80 et 60 centimètres, et dont la hauteur (parallèle au cadre) comptait 60 centimètres.

Malgré l'épaisseur et la bonne qualité des tôles, et eu égard à la pression élevée du timbre (9 kilogrammes), une pareille surface plane devait tendre à des déformations permanentes de plus en plus dangereuses.

Telle est, pour le rapporteur, la cause principale de l'explosion.

Il convient de rapprocher, de ce fait positif, le défaut de surveillance de la chaudière, livrée pendant plus d'une heure à l'aide-chauffeur, tué par l'explosion. En fait, ni le mécanicien, ni le chauffeur ne savent à quelle pression la vapeur a été portée pendant l'arrêt nécessité par l'écluse. On n'a pu retrouver les soupapes de sûreté, et l'on ne sait si elles n'ont pas été paralysées au moment critique.

Quant au vice de construction, relevé par M. Léon Lévy et que cet ingénieur propose tout au moins de signaler administrativement au constructeur, il est réel, mais il ne paraît avoir joué qu'un rôle accessoire dans l'espèce; la durée relativement longue de la chaudière, les nombreuses épreuves qu'elle a subies, l'épaisseur et la qualité des tôles en atténuent la portée. Il y a surtout lieu de recommander d'une façon générale l'emploi d'entretoises perforées qui préviennent nettement et immédiatement de leur rupture. A ce double point de vue, le paragraphe 4 de l'article 4 du décret du 9 avril 1883 permet aux Commissions de surveillance locale d'exiger efficacement la consolidation des parois planes des chaudières de bateaux à vapeur.

En conséquence, le rapporteur a l'honneur de soumettre à l'approbation de la Commission centrale l'avis suivant :

1° La cause principale de l'explosion du 19 mai 1886 réside dans la rupture préalable et déjà ancienne de cinq entretoises juxtaposées sur la face plane latérale de gauche de l'enveloppe du foyer. Cette rupture a isolé une vaste surface plane de l'enveloppe et en a favorisé l'arrachement consécutif;

2° Des visites intérieures soignées, conformément aux escriptions de l'article 65 du décret du 9 avril 1883, raient permis de constater cette dangereuse avarie ;

2° Le mécanicien et le premier chauffeur sont blâma-

bles d'avoir entièrement abandonné, pendant la durée de l'éclusée, la conduite de la chaudière à l'aide-chauffeur ;

4° Il convient, par M. le ministre des travaux publics, de rappeler aux Commissions de surveillance locales que le paragraphe 4 de l'article 4 du décret du 9 avril 1883 les autorise à exiger la consolidation efficace des parois planes des chaudières des bateaux à vapeur.

Et, dans ce but, il y a lieu d'insérer, dans les *Annales des Mines* et dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, un extrait du présent rapport.

L'ingénieur en chef des mines, rapporteur,
Signé : MICHEL LÉVY.

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

La Commission centrale, dans sa séance du 5 octobre 1886, après avoir entendu l'exposé, les observations et les conclusions qui précèdent et en avoir délibéré, a adopté l'avis proposé par le rapporteur.

CHRONIQUE

(Août 1887)

N° 50

Note au sujet du Mémoire de M. Clavenad sur la stabilité, les mouvements, la rupture des massifs en général.

Par M. D'OCAGNE,
Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Rochefort-sur-Mer.

La petite observation que je vais présenter ici, sur un point du remarquable Mémoire de M. Clavenad, ne porte que sur une simple question de calcul; elle ne touche donc en rien au fond de cet intéressant travail.

Remarquant l'identité des résultats fournis par la formule de M. Boussinesq

$$(1)\qquad K = \mathrm{tg}^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\frac{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left[\varphi-\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right]},$$

et par la sienne

$$(2)\qquad K = \frac{\cos\varphi}{(1+\sin\varphi)(1+2\sin\varphi)},$$

M. Clavenad a établi l'équivalence de ces deux formules au moyen d'une construction géométrique fort ingénieuse (*), mais qui constitue un procédé tout à fait indirect. Il n'est pas sans intérêt de remarquer comment les propriétés des fonctions trigonométriques permettent d'effectuer directement l'identification des expressions (1) et (2).

(*) Livraison de mai 1887, p. 597.

On a

$$(3)\quad \left\{ \begin{aligned} \frac{\cos\varphi}{1+\sin\varphi} &= \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}{1+\cos\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)} = \frac{2\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)} \\ &= \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right). \end{aligned} \right.$$

D'autre part,

$$\frac{1}{1+2\sin\varphi} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi+2\sin\varphi\cos\varphi} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)+\sin 2\varphi}$$

$$= \frac{2\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{3\varphi}{2}-\frac{\pi}{4}\right)}.$$

Mais $\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)$. La dernière formule peut donc s'écrire

$$(4)\quad \frac{1}{1+2\sin\varphi} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{3\varphi}{2}-\frac{\pi}{4}\right)} = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\frac{\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left[\varphi-\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right]}.$$

Multipliant (3) et (4) membre à membre, on obtient l'identification de (1) et (2).

La formule (1) de M. Boussinesq a, sur la formule (2) de M. Clavenad, l'avantage d'être calculable par logarithmes.

Note sur le ripage du tablier du viaduc métallique de Thouars.

par M. Bricka, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

Le viaduc construit à Thouars, sur la ligne de Tours aux Sables-d'Olonne, à la traversée de la rivière du Thouet, se compose d'un tablier métallique de 190 mètres de longueur reposant sur deux culées en maçonnerie et trois palées métalliques intermédiaires; le tablier n'a été construit que pour recevoir une seule voie, mais les culées et les palées ont été disposées de manière à permettre, lorsque cela serait nécessaire, l'établissement d'une seconde voie supportée par un tablier identique au pre-

mier. Toutefois, afin de ne pas produire sur les appuis des réactions inégales, le tablier unique a été placé dans l'axe de l'ouvrage. L'ouverture de la ligne de Niort à Montreuil-Bellay, qui emprunte la ligne de Tours aux Sables sur 2 kilomètres environ aux abords de Thouars, a rendu nécessaire la pose du second tablier sur le viaduc du Thouet pour l'établissement d'une deuxième voie, et, par suite, le ripage du tablier primitif; la facilité avec laquelle cette masse de 440 tonnes a été déplacée sans apporter aucun trouble dans la circulation des trains, mérite d'être signalée aux lecteurs des *Annales*.

La construction du second tablier du viaduc du Thouet et le ripage du tablier existant ont fait l'objet d'une adjudication restreinte à laquelle ont été appelés seulement les constructeurs dont les noms suivent :

Eiffel,
Établissement du Creuzot,
Compagnie de Fives-Lille,
Société des Batignolles,
Lebrun, à Creil,
Baudet, Donon et Cie,
Société anonyme des anciens établissements Cail.

Les prix portés à la série étaient de 0f,40 le kilogramme pour les fers du tablier nouveau et de 10.000 francs à forfait pour le ripage du tablier existant; le rabais fait par la maison Lebrun, Pillé et Daydé, qui a été déclarée adjudicataire, a fait descendre ces prix à 0f,3536 et 8.840 francs. Le forfait relatif au ripage comprenait tous les frais relatifs au déplacement du tablier et à sa mise en place définitive; le déplacement des voies aux abords était seul à la charge de l'Administration.

Chaque palée métallique se compose de six colonnes en fonte, entre-toisées par des croix de Saint-André en fer et couronnées par un cadre également en fer; la hauteur des palées est de 27m,60; elles reposent sous des soubassements en maçonnerie dont la hauteur au-dessus est de 2, 4 et 8 mètres.

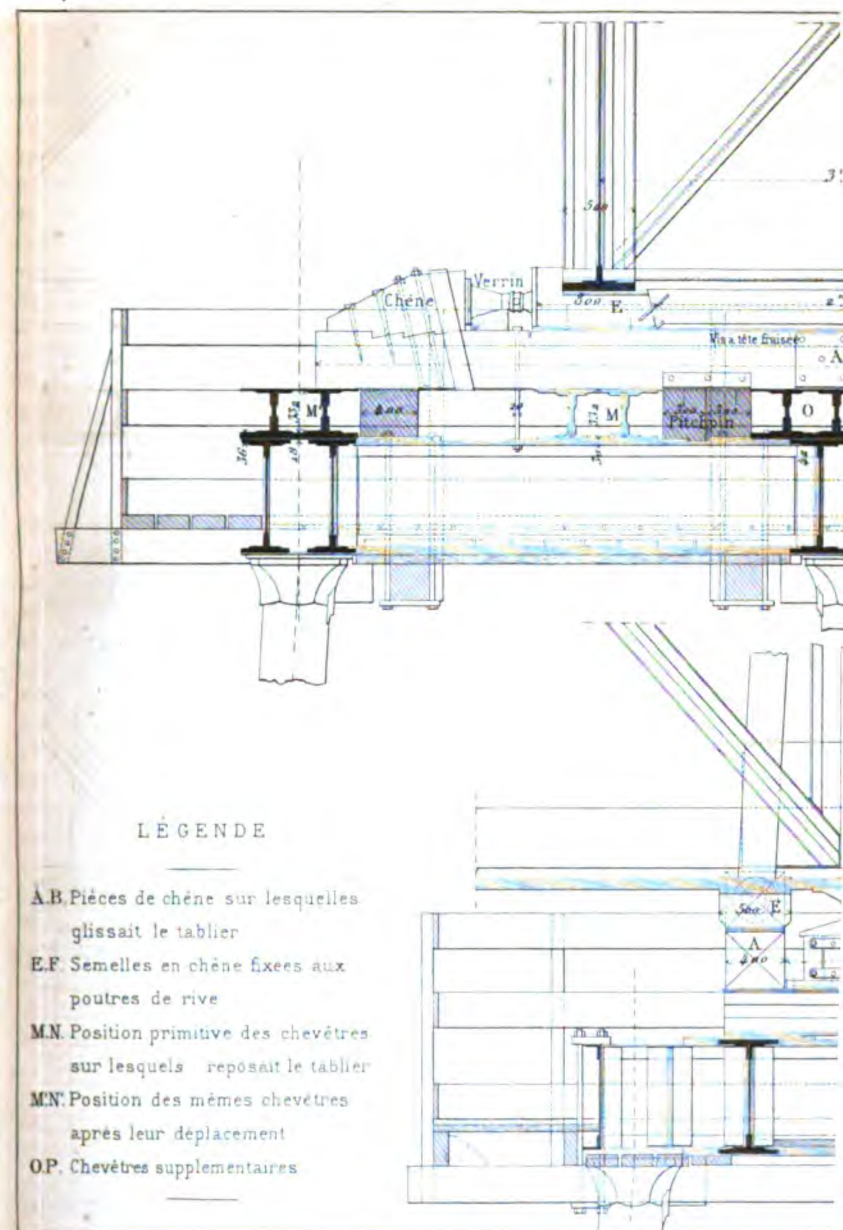
Le tablier métallique primitif reposait sur le cadre qui surmonte les colonnes de chaque palée, au moyen de deux chevêtres en forme de caissons placés dans le sens de sa longueur et qui supportaient des rouleaux de dilatation à charnière; le programme que le constructeur a soumis à l'approbation des Ingénieurs pour l'exécution du ripage, et qui a été exactement réalisé, était le suivant :

Après avoir posé, au milieu de chaque appui, deux chevêtres supplémentaires, placer en travers deux pièces de bois de 0,40 sur 0,40 d'équarrissage comprenant entre elles les appareils de dilatation et portant en saillie à une de leurs extrémités des blocs également en chêne assemblés au moyen du joint à crémaillères et de frettes; placer, entre ces frettes et chacune des poutres de rive du tablier, des sommiers en chêne reliés à ces dernières; enlever les appareils de dilatation, puis pousser le tablier au moyen de verrins couchés horizontalement et arc-boutés contre les blocs indiqués plus haut; dégager, pendant cette opération, celui des chevêtres sur lequel le tablier aura cessé de porter, pour le replacer à l'extrémité du cadre surmontant les piles, de manière à ce qu'il reçoive la poutre de rive extérieure dans sa position définitive; enfin, le ripage terminé, replacer les appareils de dilatation et enlever les pièces de bois et le second des chevêtres primitifs.

Les pièces de chêne de 0,40 sur 0,40 étaient supportées dans l'intervalle compris entre les chevêtres par des poutres en pitchpin de même hauteur que ces derniers et reposant, comme eux, sur les cadres couronnant les piles: elles étaient armées sur leur face supérieure de lames de tôles; les sommiers fixés aux poutres du tablier étaient armés de la même manière sur leur face inférieure, de telle façon que le frottement s'exerçait entre deux surfaces de fer planes et préalablement graissées. Si l'on admet un coefficient de frottement de 0,15, le poids mort du tablier au droit d'une pile étant de 123.000 kilogrammes, l'effort à vaincre pour chaque paire de verrins était de 9.225 kilogrammes. Ces engins étant de la force de 20 tonnes, une part aussi large que possible était réservée à l'imprévu; en fait, l'effort calculé paraît n'avoir pas été atteint. La surface d'appui des poutres sur les sommiers était de 750 centimètres carrés; la réaction totale sur la pile la plus chargée, y compris la surcharge résultant du passage d'un train, est de 177.000 kilogrammes; le travail du bois n'a donc pas dépassé 32 kilogrammes par centimètres carré. Avec du chêne de première qualité, comme celui qui a été employé, ce coefficient offre toute sécurité.

La mise en place des différentes pièces qui devaient être glissées sous le tablier, et l'enlèvement des appareils de dilatation, ont été faits en soulevant très légèrement les poutres de rive successivement à droite et à gauche de l'axe de chaque pile au moyen de verrins de 150 tonnes; le montant vertical qui existe dans chaque poutre au droit de l'axe de l'appui a été, pour éviter

VIADUC SUR LE THO



LÉGENDE

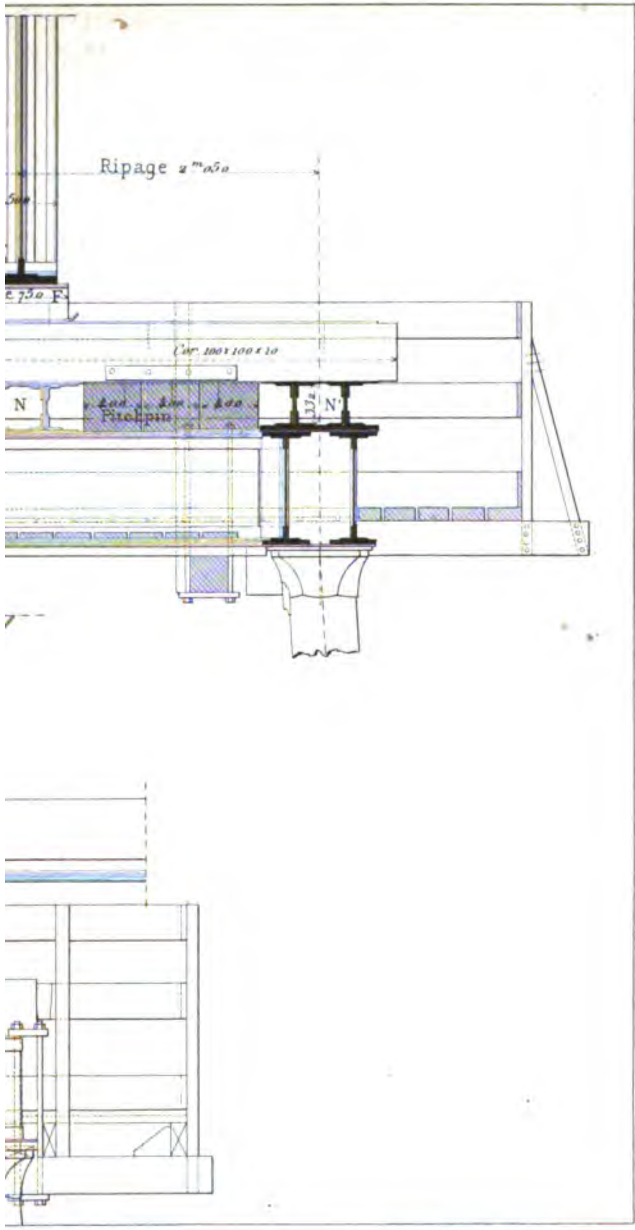
A.B. Pièces de chêne sur lesquelles glissait le tablier

E.F. Semelles en chêne fixées aux poutres de rive

M.N. Position primitive des chevêtres sur lesquels reposait le tablier

M'N'. Position des mêmes chevêtres après leur déplacement

O.P. Chevêtres supplémentaires



Gravé par Macquet

toute déformation, renforcé de deux montants provisoires en bois formant jambes de force de part et d'autre.

Pendant le ripage, la manœuvre des verrins était commandée au sifflet par un chef de chantier, de telle façon que le nombre de tours de la vis était, à chaque instant, le même dans tous les verrins; on a évité ainsi la déformation du tablier qui, pendant toute l'opération, est resté absolument rectiligne. Un balcon en bois avait été établi en encorbellement autour de chaque pile, avant le commencement des travaux, pour faciliter le travail des ouvriers.

Les diverses opérations qui précèdent ont été exécutées sans interrompre ni modifier la marche des trains; on a seulement obligé les mécaniciens à ne franchir le viaduc qu'à la vitesse d'un homme au pas pendant que le tablier est resté sur ses appuis provisoires en bois, et on a supprimé les trains facultatifs pendant les deux jours fixés pour l'opération du ripage; cette dernière précaution aurait pu être supprimée.

Pendant le ripage du tablier, une équipe d'hommes ripait aux abords la voie préalablement dégarnie et qui, de cette façon, n'a pas eu besoin d'être coupée; il en résulte que, à un moment quelconque de l'opération, un quart d'heure au plus aurait suffi pour permettre en toute sécurité le passage d'un train qui n'aurait pas été attendu.

Le ripage du tablier s'est fait à raison d'une vitesse moyenne de 1 centimètre par minute, ce qui a représenté une durée de trois heures et demie pour l'opération tout entière; celle-ci a duré un jour et demi parce qu'on a attendu, pour en faire la seconde partie, la présence des Ingénieurs qui devaient venir y assister; sans cette circonstance, le déplacement du tablier aurait été terminé en entier dans la même journée.

Les travaux ont été conduits par M. Daydé, associé de la maison Lebrun, Pillé et Daydé, sous la surveillance de M. Tyndall, Ingénieur aux chemins de fer de l'État.

Paris, 30 juin 1887.

Ciments fabriqués avec les scories des hauts fourneaux.

On fabrique aujourd'hui trois variétés de ciments avec les scories de hauts fourneaux. La première, qui est plutôt un mortier qu'un ciment, est fabriquée en broyant des scories avec 15 p. 100

de chaux et 15 p. 100 d'oxyde de fer. Le broyage est généralement fait à l'état humide et le produit doit être employé quelques heures après avoir été fabriqué, de sorte que son emploi ne peut avoir lieu que dans des circonstances tout à fait locales. Le second ciment s'obtient en broyant 75 p. 100 de scories sèches avec 25 p. 100 de chaux éteinte, d'après le procédé de M. Larsen. Il est indispensable que les matières premières soient très finement pulvérisées, afin d'être très intimement mélangées. Dans ce but, M. Larsen emploie une machine spéciale qui sert à rendre la masse homogène. La troisième variété de ciment est fabriquée d'après le procédé de M. Frédérick Ransome. On broie ensemble des parties égales de scories et de craie à l'état humide et, après séchage, on fait cuire dans un four rotatif. Le procédé est analogue à celui de la fabrication du ciment de Portland. Le tableau suivant donne l'analyse de deux des ciments dont nous venons de parler, ainsi que de deux types de ciment de Portland :

	CHAUX	SILICE	ALUMINE	PEROXYDE de fer	PROTOXYDE de fer	MAGNÉSIE	EAU
Ciment n° 1	22,90	21,61	19,85	8,80	4.00	4,36	12,00
— n° 2 (Larsen)	41,96	24,34	18,74	0,14	0,27	6,57	4,70
Portland n° 1	59,90	24,07	6,92				
— n° 2	55,57	22,92	8,00				
Scories de Middlesborough	40,00	52,31					
N° 2	36,88	51,12					
N° 3	40,45	50,08					

Ce tableau démontre que les deux premiers ciments diffèrent beaucoup du ciment de Portland ; ils en diffèrent encore plus au point de vue de leurs propriétés physiques, car la chaux est presque entièrement à l'état libre, la matière n'ayant pas subi le commencement de fusion auquel est soumis le Portland. Dans les scories, les proportions de l'alumine et de la silice sont comme 39 à 51, tandis que dans le ciment, elles sont comme 58 à 31. Par conséquent, 100 parties de scories, en y comprenant les matières inertes, exigent l'addition de 56 parties de chaux ou de 100 parties de craie sèche ou de pierre à chaux, afin d'introduire dans la masse les parties constitutives d'un bon ciment ; c'est le mélange qu'emploie M. Ransome. On obtient comme résultat un produit dont la résistance est supérieure à celle du ciment

de Portland et qui s'améliore avec les années. On en a, aujourd'hui, des échantillons fabriqués il y a sept ans, qui sont aussi bons qu'au premier jour. Le procédé n'est, naturellement, d'un usage pratique que là où l'on fait beaucoup de scories, mais il présente néanmoins l'avantage de donner une certaine valeur à un sous-produit qui n'en avait aucune jusqu'aujourd'hui. Quand on emploie le procédé Ransome, la dépense de matériel pour les fours rotatifs est insignifiante.

(*Annales industrielles.*)

Congrès du cinquantenaire des chemins de fer belges.

Lors de la célébration du Cinquantenaire des chemins de fer belges, le gouvernement avait convoqué à Bruxelles un congrès de représentants des autres gouvernements et de délégués de compagnies de chemins de fer. Cette réunion fut la première de l'espèce. Mais le grand intérêt des échanges de vues et des débats qui s'y produisirent firent comprendre à tous les participants l'utilité qu'il y aurait pour les progrès des chemins de fer à convoquer périodiquement des congrès analogues.

Une commission internationale, formée du bureau du Congrès de Bruxelles et de sa commission d'organisation, fut constituée à Bruxelles à cet effet, et elle se mit immédiatement à l'œuvre pour organiser un second Congrès qui aura lieu, à Milan, du 17 au 25 septembre prochain.

Nous avons sous les yeux le règlement de ce Congrès et son questionnaire. Seuls les gouvernements et les administrations de chemins de fer peuvent s'y faire représenter.

Le Congrès est divisé en sections comprenant les différentes spécialités de la construction et de l'exploitation des chemins de fer. Les questions à discuter sont étudiées à l'avance par les administrations de chemins de fer ainsi que par les secrétaires de sections, qui analysent leurs communications et rédigent un exposé destiné à servir de base aux discussions en sections. Ces discussions terminées, chaque section charge un de ses membres de préciser devant l'assemblée générale les points dont il pourrait être utile d'aborder la controverse.

Les questions soumises au Congrès sont au nombre de 32, mais elles ont été rédigées de façon à ne comprendre chacune

qu'un point bien déterminé. On y trouve tout ce qui préoccupe en ce moment les hommes de chemins de fer.

La section des voies et travaux a à son ordre du jour les traverses métalliques, l'emploi de l'acier dans la construction des ponts, l'entretien des voies, les mesures contre les neiges et la constitution des voies à grande circulation. La section de la traction et du matériel doit s'occuper des perfectionnements à apporter au matériel et aux locomotives, et particulièrement du graissage des freins, de l'éclairage et du chauffage. Au point de vue de l'entretien et de la réparation du matériel, elle abordera la question des primes au personnel.

Il sera aussi parlé des expériences faites pour permettre l'emploi des locomotives avec un double personnel, un de jour et un de nuit.

La section de l'exploitation étudiera l'organisation des trains de voyageurs et du mouvement des marchandises, les simplifications de service sur les lignes à faible trafic, le contrôle des voyageurs, les manœuvres dans les stations et l'éclairage des gares.

Les deux dernières sections (4e et 5e) sont : l'une, celle des questions d'ordre général, l'autre, celle des questions spéciales aux chemins de fer secondaires. La 4e comprend des questions de personnel et plusieurs autres, parmi lesquelles nous signalerons le développement des relations internationales. Dans la 5e section, nous citerons les dispositions générales des chemins de fer secondaires, leurs moyens spéciaux de traction (électricité), leurs freins, etc.

. . . .



N° 51

ANALYSE

DE L'OUVRAGE DE MM. LAVOINNE ET PONTZEN

SUR LES

CHEMINS DE FER EN AMÉRIQUE

Par M. JULES MARTIN, Ingénieur en chef, Professeur à l'École des ponts et chaussées.

MM. Lavoinne et Pontzen ont publié sur les chemins de fer de l'Amérique un ouvrage très complet et très instructif.

Nous l'avons lu avec le plus vif intérêt et nous croyons utile d'en faire une analyse et d'appeler l'attention des ingénieurs sur les traits caractéristiques de ces chemins de fer.

Des progrès incontestables ont été réalisés par les ingénieurs américains; les ingénieurs français pourront, dans bien des circonstances, profiter des expériences faites.

Ces progrès ont été pour la plupart la conséquence des difficultés spéciales rencontrées et de l'esprit qui anime les populations américaines.

Nous essayerons de faire ressortir cette pensée au fur et à mesure que nous avancerons dans notre travail.

Le tome Ier de l'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen étudie avec détail la construction des chemins de fer.

Il est divisé en quatre parties :

La superstructure;
L'infrastructure;
Les gares et stations;
Le prix de revient.

Pour faire ressortir nettement les motifs qui ont conduit les ingénieurs américains à exécuter leur réseau suivant des principes qui diffèrent essentiellement de ceux qui ont été suivis en Europe, MM. Lavoinne et Pontzen ont fait précéder leur travail d'un aperçu géographique et technique embrassant l'Amérique du Nord tout entière.

CHAPITRE Ier.

APERÇU GÉNÉRAL.

Dans le chapitre Ier, ils ont décrit les obstacles principaux qu'il fallait surmonter pour relier entre eux, non seulement les États-Unis d'Amérique, mais encore toutes les possessions anglaises.

On voit les premières lignes relier les bassins des grands fleuves qui servaient primitivement de voies de communication entre les villes principales, et franchir les chaînes de montagnes.

Lorsqu'on voulut souder entre eux les tronçons de ligne qui avaient eu pour principal but de compléter les voies navigables, de manière à former ces grandes artères qui s'étendent de l'Atlantique au Pacifique, il fallut franchir les grands fleuves.

Nous verrons avec MM. Lavoinne et Pontzen comment les Américains ont surmonté provisoirement et rapide-

ment les difficultés de toute nature qui se sont présentées, comment ils ont perfectionné leurs travaux lorsque les ressources mises à leur disposition par l'accroissement de trafic leur ont permis de transformer les ouvrages provisoires en ouvrages définitifs.

Pour les Américains, la première condition à remplir, c'est de marcher vite, c'est d'arriver au but sans aucun retard. Si un obstacle se rencontre et barre le passage, ils ne s'arrêtent pas pour le renverser, ils le tournent provisoirement.

CHAPITRE II.

DÉVELOPPEMENT PROGRESSIF DES CHEMINS DE FER EN AMÉRIQUE.

Dans le chapitre II, MM. Pontzen et Lavoinne nous montrent trois périodes distinctes dans la construction des chemins de fer.

La première s'étend de 1825 à 1845, jusqu'à la crise financière qui arrêta toutes les entreprises pendant près de dix ans.

Dans la deuxième, qui dura également près de vingt ans, de 1845 à la fin de la guerre de sécession, les chemins de fer prirent un assez grand développement. La guerre civile arrêta tous les travaux pendant quatre ans.

Mais bientôt survint une troisième période qui fut, au point de vue des travaux de chemins de fer, d'une fécondité inouïe. C'est au courant de cette période qu'on vit les Américains construire, dans une année, 12.348 kilomètres et poursuivre avec une rapidité extraordinaire ces lignes transcontinentales qui ont, à si juste titre, excité l'admiration des ingénieurs.

Les trois tableaux ci-dessous dressés par MM. Lavoinne et Pontzen donnent quelques renseignements statistiques sur le développement progressif des chemins de fer en Amérique.

DÉSIGNATION DES GROUPES	LONGUEURS EN KILOMÈTRES des chemins de fer exploités		
	en 1845	en 1865	en 1875
Etats de la Nouvelle-Angleterre	1.566	6.173	9.077
Etats du Centre	3.381	13.748	23.731
Etats de l'Ouest	602	20.684	57.714
Etats du Sud	1.910	15.507	25.630
Etats du Pacifique	»	375	4.048
Totaux	7.459	56.489	120.200

Depuis un certain nombre d'années, la construction des chemins de fer n'a fait que suivre les progrès de la population, qui se sont ressentis du ralentissement de l'immigration. On aura une idée de l'accroissement annuel du réseau des voies ferrées et de l'importance corrélative de l'immigration, par les chiffres suivants correspondant aux huit dernières années.

ANNÉES	NOMBRE DE KILOMÈTRES de voie ferrée construits	NOMBRE D'IMMIGRANTS débarqués à New-York
1870	9.161	212.626
1871	12.348	227.359
1872	11.817	292.406
1873	6.252	270.516
1874	3.260	140.041
1875	2.513	84.560
1876	3.944	68.264
1877	3.672	54.536
1878	4.318	

Au commencement de 1879, il y aurait aux États-Unis, d'après M. Poor, un réseau de 131.746 kilomètres de chemins de fer pour 48 millions d'habitants et, dans ces der-

nières années, la population se serait accrue de 3 p. 100 par an, tandis que les chemins de fer s'accroissaient de 3 1/3 p. 100.

La proportion actuelle de 1 kilomètre de chemin de fer pour 364 habitants serait sensiblement la même qu'en 1875; elle est trois fois plus considérable que pour la Suède, le pays d'Europe où elle est la plus forte, et six fois plus grande que pour la moyenne de l'Europe où elle est environ de 1 kilomètre pour 2.080 habitants (*).

Sur le total de 4.318 kilomètres construits en 1878, il y en a 2.481, c'est-à-dire plus de la moitié, à l'ouest du Mississipi. Les États, où il en a été construit le plus, sont ceux de la Minnesota, Jowa, Missouri, Colorado, Pennsylvanie, Kansas. Il en a été ouvert, pour la première fois, sur les territoires d'Idaho et d'Arizona. La part de la voie étroite a continué à s'accroître sur les nouvelles lignes; il en a été construit 1.238 kilomètres, en 1877, et 1.401 kilomètres, en 1878.

INDICATIONS	ÉTATS de la Nouvelle-Angleterre	ÉTATS du Centre	ÉTATS de l'Ouest	ÉTATS du Sud	ÉTATS du Pacifique	TOTAUX et moyennes
Superficie en kilomètres carrés. . .	117.165	326.936	3.338.832	2.075.956	1.926.086	7.844 975
Nombre de kilomètres de chemins de fer.	9.077	23.731	57.714	25.630	4.048	120.200
Nombre de kilomètres carrés de superficie correspondant à 1 kilomètre de voie. . .	19,5	13,8	57,8	81	475,5	65,3
Population	3.768.441	11.197.569	15.469.800	12.150.328	1.149.580	43.785.718
Nombre d'habitants correspondant à 1 kilomètre de voie . . .	415	472	268	474	284	364
Capital dépensé en francs.	1.599.367.900	7.478.824.650	10.405.834.200	3.162.742.000	1.101.460.600	23.748.229.550
Prix de revient moyen du kilomètre en francs. . .	176.200	315.150	180.300	123.400	272.100	197.575

(*) En France, il y a 1 kilomètre pour 1160 habitants environ.

CHAPITRE III.

TRACÉS.

La lecture du chapitre relatif aux tracés de chemins de fer fera disparaître certains préjugés et montrera bien des dispositions qui devraient être adoptées en Europe.

S'il est vrai que les ingénieurs américains ont dû, comme les ingénieurs européens, modifier les principes qui ont présidé à l'étude des tracés, eu égard aux progrès successivement réalisés dans l'exploitation technique des chemins de fer, il n'est pas vrai de dire que l'étude des tracés, en Amérique, ait été faite légèrement et avec précipitation.

La question des tracés a donné lieu aux études les plus minutieuses et les plus variées, afin de réduire les dépenses de premier établissement et d'exploitation à la dernière limite; mais, dès que les projets sont définitivement arrêtés, les ingénieurs américains, pressés par la nécessité de ne pas laisser longtemps improductifs des capitaux pour lesquels le taux d'intérêt s'élevait quelquefois à 10 p. 100, les ingénieurs américains, disons-nous, ne négligeaient rien pour livrer la ligne au service de l'exploitation dans le plus court délai possible.

On peut citer, en Europe, des compagnies de chemins de fer dont les travaux n'étaient commencés que lorsque tout était prêt pour les mener à bonne fin et qui organisaient leurs services de manière à réduire au minimum la période d'exécution.

Seulement, comme les compagnies européennes ont une liberté d'allure moins grande que les compagnies américaines, il ne leur était pas permis d'adopter les expédients devant lesquels ne reculaient pas les ingé-

nieurs américains pour ne pas laisser improductifs les capitaux dépensés.

Ainsi, lorsque la traversée d'une chaîne de montagne exige la construction d'un long souterrain, les Américains n'attendent pas l'achèvement du souterrain pour livrer la ligne à la circulation, ils établissent une voie provisoire économique, mais présentant des rampes fortes et des courbes de faible rayon sur lesquelles on passera pendant plusieurs années en ralentissant la marche des trains. Au besoin, ils feront des tracés en zigzags avec des rebroussements successifs sur lesquels les trains circulent lentement, machine en tête ou machine en queue.

Lorsque l'obstacle à franchir est un ravin profond exigeant la création d'un ouvrage d'art très coûteux, ils le remplacent temporairement par un viaduc en bois sur lequel passent les trains; ils remplaceront le viaduc en bois par un viaduc en fer ou un remblai lorsque la compagnie exploitante pourra réaliser les ressources nécessaires pour le construire.

Si l'obstacle à franchir est un grand fleuve sillonné par des bateaux à vapeur, ils exécutent provisoirement des ponts tournants, des bacs à vapeur et le train passe en attendant le jour où il sera possible de faire un grand pont.

On ne voit pas, en Amérique, des lignes construites sur les 9/10 de leur parcours et restant inutilisées pendant plusieurs années.

Dans un grand nombre de circonstances, les Américains ont construit et exploité des lignes ou sections de lignes à faibles rayons et à fortes pentes analogues, pour ainsi dire, à des voies de terrassements; c'étaient des installations fort imparfaites sans doute, mais elles n'étaient que provisoires; et, ainsi qu'il arrive souvent, le bien est sorti du mal. Placés dans la nécessité d'exploiter des lignes

défectueuses, les ingénieurs ont dû modifier leur matériel roulant; ils ont dû lui donner toute la flexibilité possible en lui conservant la stabilité nécessaire.

De là, l'idée des boggies qui permettent de circuler sur des courbes de 70 mètres de rayon (*).

De là, la nécessité de donner de grandes largeurs aux bandages afin de ne pas dérailler.

Les expédients employés avec succès par les Américains, pour hâter autant que possible la mise en exploitation de leurs voies ferrées, auraient pu recevoir en France d'utiles applications.

L'histoire des chemins de fer américains pourrait encore être très utile au point de vue stratégique, et nous croyons devoir appeler l'attention des ingénieurs sur ce point.

Un des problèmes qui se posent fréquemment aux ingénieurs pendant la guerre, c'est de trouver immédiatement le moyen le plus rapide de rétablir une voie interrompue par suite de la rupture d'un pont ou de l'effondrement d'un souterrain. Or, on trouvera dans les procédés suivis par les ingénieurs américains pour mettre rapidement en communication des territoires très étendus, bien des solutions plus ingénieuses les unes que les autres.

Ce point de vue spécial ne devrait pas être négligé en ce moment, et je voudrais que chacun de nous les eût étudiées avec le plus grand soin.

Le calme apparent au milieu duquel nous vivons est un calme trompeur (**).

Nos voisins se préparent à la guerre et la situation est à peu près la même que celle qui nous était signalée par Prévost-Paradol en 1869.

(*) Le rayon s'abaisse jusqu'à 43,60 et 41,95 dans les dépendances de la gare de Pittsburg.

Sur l'Union pacifique on s'est contenté, entre deux courbes de sens contraire, de ménager un alignement droit égal à la longueur d'une locomotive.

(**) Ce mémoire a été écrit le 7 mai 1886.

Nous n'avons pas à signaler ici les progrès réalisés au point de vue de l'armement ; mais nous voudrions que les ingénieurs fussent au courant de tous les expédients utiles pour établir ou rétablir des voies de fer provisoires. Or, aucun ouvrage n'est plus instructif que l'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen, et c'est le principal motif pour lequel nous nous sommes décidé à appeler sur lui l'attention de nos camarades en leur donnant une analyse qui les décidera, nous l'espérons, à lire et à méditer ce remarquable travail.

CHAPITRE IV.

TERRASSEMENTS.

Si, pour réduire la dépense de premier établissement, les ingénieurs américains ont cru devoir exécuter certaines sections avec de fortes déclivités et des courbes de faible rayon, ils n'ont pas hésité plus tard, pour satisfaire aux exigences d'un grand trafic, à faire des rectifications très coûteuses et à parachever leurs lignes principales, de manière à se rapprocher des conditions d'exploitation admises en Europe.

MM. Pontzen et Lavoinne nous donnent dans le chapitre IV quelques détails relatifs aux profils en travers adoptés en Amérique. Nous trouvons dans l'examen de ce détail l'esprit général des Américains, qui les conduit à faire la moindre dépense pour gagner du temps et ouvrir la ligne dans le plus court délai possible.

La largeur de la plate-forme, l'épaisseur du ballast, la profondeur des fossés, tout se réduit au strict nécessaire.

Souvent même le ballast est complètement supprimé ; lorsque le chemin sera exploité, on complètera les ter-

rassements, on consolidera les traverses, on assainira les tranchées, etc...

En agissant ainsi, les Américains économisent l'excédant de ballast que les ingénieurs européens sont obligés d'employer pour parer aux effets du tassement des remblais, et ils réduisent dans une notable proportion les frais de transport. Nous avons eu l'occasion de les imiter, sur le conseil de M. Solacroup, pour la pose de la deuxième voie entre Limoges et Périgueux. La ligne a pu être livrée rapidement à l'exploitation, et la compagnie a réalisé des économies importantes.

Les progrès réalisés par les Américains dans l'art de construire résultent encore, en partie, de ce que le prix de la main-d'œuvre est très cher en Amérique (*), et de ce qu'on ne trouve pas la moindre ressource dans les pays inhabités qu'il faut traverser.

S'ils suivaient les errements usités en Europe, les travaux exigeraient des dépenses énormes et de longs délais ; ils sont dans l'obligation absolue d'employer les moyens mécaniques et de réduire au minimum le nombre des ouvriers.

MM. Pontzen et Lavoinne ont décrit avec quelques détails les scrapers, les excavateurs ou dragues à sec, les machines perforatrices qui pourraient rendre de bons services dans un grand nombre de circonstances en Europe.

Il faut le reconnaître, plusieurs lignes, aujourd'hui prospères, n'auraient pas été construites, si l'on n'avait pas réduit au strict nécessaire les dépenses de premier établissement, parce qu'on se trouvait dans l'impossibilité de réunir les capitaux qu'aurait exigé le parachèvement complet des travaux.

(*) Le prix de la journée d'un terrassier varie de 5 à 10 francs.

CHAPITRE V.

OUVRAGES D'ART.

Nous n'analyserons pas le chapitre si intéressant que MM. Lavoinne et Pontzen ont consacré aux ouvrages d'art ; nous sortirions du cadre que nous nous sommes tracé.

Cependant nous croyons devoir appeler l'attention du lecteur sur quelques détails qui caractérisent la préoccupation constante des Américains : marcher vite en réduisant les dépenses. Ainsi leurs projets sont toujours combinés de manière à ramener toutes les pièces à des formes peu variées, et à réduire au minimum la main-d'œuvre sur les chantiers des travaux.

C'est surtout à la construction des ponts en charpente que l'art de l'ingénieur s'est exercé en Amérique. Bientôt les fermes américaines ont été appropriées à l'emploi de la fonte et du fer, et les principes sur lesquels reposent les types perfectionnés méritent d'être étudiés par les ingénieurs européens.

Pour la préparation et le montage des charpentes en bois américaines, trois outils suffisent : la scie, la hache et la tarière.

L'emploi du bois pour les ponts d'une grande portée présente de graves inconvénients ; les ouvrages offrent plus de prise au vent ; ils peuvent être brûlés ; leur entretien est coûteux et leur durée est très limitée ; aussi les remplace-t-on par des ponts en fer. L'étude des ouvrages en bois ne présente d'intérêt sérieux qu'au point de vue de la guerre.

Pour des ouvrages dont les travées varient de 9 à 20 mètres, le cube de bois employé par mètre courant

varie de $2^{mc},91$ à $4^{mc},22$; le poids de fer ou fonte est de 163 à 555 kilogrammes, et le prix par mètre courant à une voie se maintient entre 350 et 800 francs, le mètre cube de bois étant payé de 75 à 100 francs, et le kilogramme de fer 1 franc (*).

Sans entrer dans des détails que les ingénieurs devront lire dans l'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen, lorsqu'ils auront à construire des ponts en métal de grandes portées, nous ferons remarquer que les Américains adoptent presque toujours des travées discontinues (**); que pour les pièces soumises à des efforts de tension, ils font leurs assemblages sans rivure (***) au moyen de boulons formant axe d'articulation; qu'ils ont une tendance à généraliser l'emploi des fers à T ou en ⊔ réunis par des plates-bandes.

La limite généralement adoptée pour les efforts de tension dans les semelles inférieures et les tirants inclinés voisins des culées est de $7^{k},13$ par millimètre carré pour le fer.

(*) Sur la ligne de Louisville à Cincinnati, on a fait des ponts triangulaires en fer et bois qui, pour des portées de 30 mètres, sont revenus à 610 francs seulement par mètre courant.

(**) « Il est absolument impossible de réaliser dans la pratique les hypo-« thèses sur lesquelles s'appuie la théorie des poutres continues. — Indépen-« damment des tassements inégaux et des variations du module d'élasticité « dans les pièces qui constituent la charpente métallique, les variations de « température, en affectant inégalement les diverses parties de cette charpente, « peuvent amener des changements considérables dans les réactions des appuis « et dans le travail des pièces. »

(***) « Les assemblages des pièces au moyen de rivures ont le multiple in-« convénient d'affaiblir les pièces aux points où elles ont le plus besoin de ré-« sistance, d'altérer en outre cette résistance dans la portion de la section « conservée, de faire travailler inégalement les rivets et enfin de se prêter « difficilement à la transmission des efforts dans la direction des axes de ces « pièces; ils sont, à tous les points de vue, notablement inférieurs aux assem-« blages à articulation qui ont de plus l'avantage, malgré la variation des « angles que les pièces forment entre elles, de distribuer toujours uniformé-« ment les efforts transmis, lorsque l'exécution du travail ne laisse rien à dé-« sirer au point de vue de la précision. »

Les barres à œil étant les pièces essentielles du système articulé ont été l'objet d'une étude toute particulière de la part des ingénieurs américains; on trouvera donc dans l'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen les résultats consacrés par une longue pratique, non seulement en ce qui concerne les dimensions à adopter, mais encore en ce qui concerne les meilleurs procédés de fabrication.

Lorsque les Américains utilisent l'acier, ils admettent pour les efforts de tension la limite de 16 kilogrammes par millimètre carré, l'effort limite de rupture par tension étant de 72 kilogrammes par millimètre carré (*).

On sait que les ingénieurs anglais et allemands n'admettent pas des efforts supérieurs à $10^{k},50$ par millimètre carré.

Nous devons ajouter que les progrès accomplis dans la fabrication de l'acier ont permis, dans le cahier des charges pour la fourniture des câbles d'acier du pont suspendu sur la rivière de l'Est, à New-York, d'exiger des fils dont la limite de rupture atteint 115 kilogrammes par millimètre carré, et qu'on fait travailler à raison de $\left(\frac{115}{6} = 19^{k}\right)$ par millimètre carré.

N'oublions pas de signaler une remarque importante qui a été faite par M. Shaler-Smith, de laquelle il résulte que la détermination des efforts limites de compression ou de tension, devrait tenir compte de la fréquence de la répétition de ces efforts au passage de la charge roulante; qu'il y aurait lieu, par conséquent, de faire varier ces efforts pour chaque pièce, en raison de sa position dans l'ouvrage, si l'on veut que toutes les parties du

(*) A la compression ils admettent 20 kilogr. par millimètre carré, les pièces devant résister sans altération permanente à une compression de 43 kilogr. et à une tension de 29 kilogr.

pont ne soient pas soumises à des épreuves trop inégales, et qu'elles présentent toutes les mêmes chances de durée ou de sécurité.

En discutant les divers systèmes de ponts à grandes portées exécutés en Amérique (Fink, Bollman, Howe, Prattpettit, Wipple-Liuville-port), MM. Lavoinne et Pontzen ont eu soin de rappeler les divers accidents qui sont arrivés, d'en analyser les causes et de mettre les ingénieurs en garde contre les fautes commises.

Ils ont fait voir comment on a utilisé les diverses matières (bois, fer, fonte, acier), et quelles sont les précautions à prendre pour prévenir les ruptures, notamment dans les ponts où l'on emploie la fonte. Rien de plus instructif que la méthode historique lorsqu'elle est judicieusement et consciencieusement employée.

Les faits mis successivement sous les yeux du lecteur montrent, ici, le danger que présentent quelquefois l'emploi de la fonte dans les fermes de pont et la réunion de matériaux d'espèce différente dont le réglage est difficile; là, l'avantage au point de vue de la solidité et de l'économie, que les Américains ont trouvé en augmentant le rapport de la hauteur des fermes à leur portée, rapport qui s'est élevé progressivement de 1/10 à 1/5; plus loin, l'avantage au point vue de la facilité du montage et de la rapidité d'exécution, de l'adoption d'une série de pièces courantes uniformes pour lesquelles les usines possèdent des machines-outils spéciales, etc., etc.

La rapidité d'exécution des ponts métalliques a été quelquefois vraiment bien extraordinaire, et nous croyons devoir rappeler en passant que le pont de Nicholson, sur la Delaware, comprenant trois travées de $40^{m},80$ de portée, aurait été commandé le 27 novembre 1876 et livré à la circulation le 30 décembre suivant, soit dans un délai de 33 jours. Le poids par mètre courant était de 2.058 kilogrammes; le prix de $0^{f},438$ par kilogramme se décom-

posait ainsi : $0^f,43$ pour le fer pris à l'usine, $0^f,003$ pour le transport et $0^f,005$ pour le montage.

Nous terminerons cette rapide analyse en faisant remarquer que les Américains ne soumettent pas toutes les pièces au même effort par millimètre carré ; s'ils admettent un effort de $8^k,60$ pour les pièces de fer qui ne sont soumises au travail maximum de tension que progressivement, ils ont soin de réduire cet effort à 7 kilogrammes pour les pièces exposées à supporter directement, à chaque passage de trains, la brusque surcharge due au poids des locomotives ou la répétition des efforts maxima tels que les étriers d'attache des entretoises, les tirants de la partie centrale des travées, etc.

Les ingénieurs américains ont toujours soin de relever la ligne des tracés étudiés, de manière à réduire la profondeur des tranchées. Les déblais provenant des tranchées sont en grande partie mis en dépôt et les remblais sont remplacés par des viaducs à faibles portées en bois ou fer.

Lorsque les produits de l'exploitation permettent de parachever la ligne, ils remplacent les estacades en bois soit par des remblais au milieu desquels l'estacade est noyée jusqu'au jour où le tassement du remblai est complet, soit par des viaducs en fer.

Ils obtiennent ainsi un double résultat, celui d'ouvrir promptement le chemin de fer à la circulation et celui d'ajourner les dépenses à une époque où l'exploitation aura fourni les ressources nécessaires.

L'étude des types de viaducs à faible portée (*) pourrait être utile aux ingénieurs chargés de rétablir promptement la circulation sur une partie de voie coupée par l'ennemi.

(*) En général la portée est de 30 pieds ($9^m,15$). Les ingénieurs du Cincinnati-Southern ont trouvé qu'il y avait économie à doubler cette portée lorsque la hauteur à franchir dépasse 18 mètres.

DÉSIGNATION des OUVRAGES	NOMBRE et longueur des travées	HAUTEUR MAXIMA des piles	POIDS			MODE DE CONSTRUCTION des PILES	DIMENSIONS DES PILES			
			des piles par mètre de hauteur	du tablier par mètre courant	par mètre carré d'élévation		AU SOMMET		A LA BASE	
							Épaisseur	Largeur	Épaisseur	Largeur
1° *Viaducs à une voie.*	mèt.	mèt.	kil.	kil.	kil.		mèt.	mèt.	mèt.	mèt.
Sitter (Suisse), construit en 1856	2 de 36,24 2 de 38,40	47,80	8.961	2.200	165	Piles composées de châssis en fonte superposés	3,50	4,85	5,50	10,50
Iglawa (Autriche), construit en 1869-1870	6 de 59,40	26,40	3.778	2.800	164	Piles composées chacune de quatre colonnes en fonte reliées par des entretoises en fer	2,80	5,50	4,80	9,52
Cère (France), construit en 1866	1 de 45,25 1 de 41,25 3 de 50,00	33,90	3.700	2.260	147	Piles composées de huit colonnes en fonte	2,50	5,00	4,60	9,20
Double (France), construit en 1871	6 de 50,00	57,50	3.328	2.350	104	Piles composées de quatre colonnes en fonte avec consoles à la base	2,50	3,50	4,50	19,00
Varrugas (Pérou), construit en 1873	3 de 30,50 1 de 38,10	76,80	2.920	770	62	Piles en fer composées chacune de trois fermes contenant quatre arbalétriers figurant ûn W renversé	15,25	4,57	15,25	17,37
Kentucky-River (Etats-Unis), construit en 1876	3 de 111,40	51,00	2.800	1.123	75	Piles en fer composées chacune de quatre arbalétriers	0,75	5,40	8,40	21,45
2° *Viaducs à deux voies.*										
Grumling (Angleterre), construit en 1850	10 de 45,75	53,00	»	»	157	Piles en fonte composées chacune de trois palées contenant : celle du milieu six colonnes, celles des bords quatre colonnes	4,88	9,00	6,54	13,25
Fribourg (Suisse), construit en 1862	2 de 40,00 5 de 44,00	43,20	7.500	3.660	220	Piles en fonte contenant chacune quatre arbalétriers convergents	4,18	6,30	6,20	10,00
Busseau-d'Ahun (France), construit en 1865	1 de 45,25 1 de 41,25 4 de 50,00	33,90	4.873	4.170	240	Piles en fonte à deux palées contenant chacune quatre arbalétriers convergents	2,00	6,00	3,40	10,20
Portage (État-Unis) construit en 1875	1 de 36,50 2 de 30,50 4 de 15,25	61,00	1.880	748	60	Piles en fer formées de deux palées, chacune contenant deux arbalétriers avec colonnes verticales intermédiaires dans les palées	15,25	6,00	15,25	21,25

MM. Pontzen et Lavoinne, après avoir décrit quelques-uns des grands viaducs américains, ont appelé l'attention des ingénieurs sur le grand viaduc de Kintucky-River, à trois travées de 114^{m},40, dont la semelle supérieure présente deux articulations permettant au pont de subir, sans inconvénient, le relèvement des piles métalliques sous l'influence de grandes variations de température ; ils ont enfin résumé dans un tableau, que nous croyons utile de transcrire ci-contre, le poids et les dimensions principales de quelques grands viaducs construits en Europe et en Amérique.

Économie de matière. — Montage facile et rapide. — Ce qui caractérise les ponts américains, c'est l'économie de la matière et surtout le montage rapide et facile des pièces qui forment les viaducs.

En général, les Américains établissent préalablement des palées en charpente embrassant un ou plusieurs panneaux de la travée ; ces palées reçoivent un tablier provisoire sur lequel on assemble les pièces de la semelle inférieure.

Un deuxième étage de pont provisoire permet de soutenir la semelle supérieure un peu au-dessus de sa position définitive, afin de pouvoir mettre facilement en place les montants verticaux et les diagonales. On fait ensuite descendre progressivement la semelle supérieure pour l'assembler avec les pièces de l'axe, et on serre à bloc tous les tirants, en tournant les écrous dont ils sont munis, après avoir mis en place toutes les pièces du contreventement transversal dont on facilite le montage en écartant légèrement les fermes.

Voilà, en deux mots, la succession des opérations suivies généralement par les Américains pour le montage des viaducs ; ils reprochent au système de lançage, ordi-

nairement pratiqué en Europe, de fatiguer les fermes aux endroits les plus faibles.

Les pièces qui entrent dans la composition des fermes étant préparées à l'usine avec des dimensions identiques au moyen de machines, on conçoit que le montage des plus grands ouvrages puisse être effectué dans un délai très court, et au moyen d'un petit nombre d'ouvriers ordinaires.

Il suffit de préparer les échafaudages pendant que l'usine fabrique les séries de pièces spéciales à chaque construction.

On estime qu'il suffit, en général, d'une équipe de vingt hommes pour monter en une journée une ferme de 45 mètres de portée.

Le pont de Nicholson, sur la Delaware, comprenant trois travées de 40 mètres, et que nous avons signalé plus haut comme ayant été exécuté en trente-trois jours, à partir du jour de la commande, a été monté en sept jours, au mois de décembre et malgré la neige.

Les exemples donnés par MM. Pontzen et Lavoinne, et les observations pratiques dont ils les accompagnent, sont du plus grand intérêt.

Ils montrent que les Américains se préoccupent des efforts maxima auxquels peuvent être soumises les diverses parties de la construction pendant le montage, et qu'ils s'astreignent à ne jamais dépasser 15 kilogr. par millimètre carré, lorsqu'ils sont dans l'obligation absolue de laisser l'ouvrage en porte-à-faux.

Ponts mobiles. — La construction des ponts tournants est analogue à la construction des ponts fixes.

Ici, comme partout, nous voyons l'esprit pratique des Américains.

Le pont tournant est toujours à double travée et, lorsqu'il s'ouvre pour livrer passage à un bateau, on le voit

quelquefois continuer son évolution derrière le bateau pour venir se refermer sans perdre un instant.

Il existe à Chicago un pont tournant de 236 tonnes, qui est ouvert en moyenne quatre-vingts fois par jour et qui peut être manœuvré par deux hommes en quarante-cinq secondes.

Nous croyons utile de reproduire les résultats des expériences faites par M. Schaler-Smith, sur les résistances à vaincre pour manœuvrer les ponts tournants, lorsque le vent ne contrarie pas l'opération :

INDICATION de L'EMPLACEMENT des ponts tournants	LONGUEUR totale du pont en mètres	POIDS		RAYON de la couronne des galets en mètres	NOMBRE de galets	DIAMÈTRE des galets en mètres	CHARGE sur chaque galet en kilogr.	FROTTEMENT par 1.000 kilogr. de charge en kilogr.
		total du pont en tonnes	par mètre courant en kilogr.					
Tennessee-River . .	87,54	173,0	1.970	4.02	22	0,843	7.873	6,98
Gumberland-River.	86.62	173.0	2.000	4,02	22	0,813	7 850	5,77
Green-River.	83,32	179.0	2 140	3,66	20	0,813	8 955	7,32
Louisville	80,52	237,0	2.940	4,12	24	0,813	9.877	5,33
Nashville	85,40	175,0	2 050	4.20	24	0,825	7.312	7.43
Arkansas.	107,90	285,0	2.730	3,97	24	0,406	11.862	7,00
Rock-Island.	112,24	682,0	6.090	4,58	34	0,762	20.074	7,36
Salt-River.	92.42	182,0	1 970	3,34	34	0,457	5.362	7,71
White-River.	85.71	183,0	2 140	3,34	34	0,457	5.377	3,50
Big-red-River. . . .	80,22	172,5	2.130	3,34	34	0,457	5 071	7.18
Little-red River. . .	61,00	148,2	2.420	3.34	34	0,457	4.359	7,21

Épreuves. — Le cahier des charges pour la construction des ponts métalliques stipule ordinairement que la flèche prise par chaque travée sous la charge d'épreuve ne dépassera pas 1/1.200 de la portée.

L'épreuve est faite par des trains composés d'un certain nombre de locomotives, suivies de wagons de marchandises à pleine charge, qu'on fait stationner pendant quelque temps sur chaque travée et qu'on fait circuler ensuite avec une vitesse qui ne dépasse pas généralement 40 kilomètres à l'heure.

Nous donnons dans le tableau ci-après le résultat des épreuves faites sur un certain nombre de ponts :

INDICATION DU PONT	SYSTÈME de fermes	PORTÉES en mètres	FLÈCHE au milieu en millimètres	RAPPORT de la flèche à la portée	CHARGE en kilogrammes par mètre courant		COMPOSITION des TRAINS D'ÉPREUVES
					permanente	roulante	
Saint-Joseph (sur le Missouri). .	Linville	90,0 24,0	64 16	1 : 1.406 1 : 1.500	4.100 2.200	3.330 3.330	Une locomotive suivie de wagons chargés couvrant la travée.
Burlington (sur le Mississipi) . .	Linville	75,0	63	1 : 1.190	2.866	2.400	Deux machines avec quatre wagons pesant 180 tonnes en totalité.
Louisville (sur l'Ohio)	Fink	74,9	44	1 : 1.700	3.610	2.660	Quatre machines pesant ensemble 200 tonnes.
	Triangulaire. .	122,00	28	1 : 4.357	6.040	1.640	Quatre machines pesant ensemble 200 tonnes.
	Triangulaire. .	112,80	25	1 : 4.512	5.500	1.770	Quatre machines pesant ensemble 200 tonnes.
Saint-Charles (sur le Missouri).	Fink	92,7	90	1 : 1.030	3.660	3.600	Sept machines pesant ensemble 334 tonnes.
	Triangulaire. .	96,5	78	1 : 1.237	3.470	3.460	Sept machines pesant ensemble 334 tonnes.
Stenbeuville (sur l'Ohio).	Linville	97,0	Insensible	»	5.600	3.000	Deux machines suivies de wagons chargés.
Cincinnati (du Cincinnati-Southern RR, sur l'Ohio)	Linville . . .	138,3	52	1 : 3.044	8.090	2.740	Sept machines et quatre wagons pesant ensemble 434 tonnes.
		91,5	40	1 : 2.288	3.700	3.390	Six machines pesant ensemble 306 tonnes.
		58,0	20	1 : 2.900	2.300	3.300	Quatre machines pesant ensemble 187 tonnes.

Le chapitre V, relatif aux ouvrages d'art, est terminé par un résumé dont nous croyons devoir extraire les passages suivants :

« On peut dire, en définitive, qu'avec un pont en treillis à rivures d'une exécution médiocre, un accident est moins à craindre qu'avec un pont à articulations dont l'exécution serait également défectueuse, et qu'à égalité d'efforts maxima, une ferme à articulations, dont toutes les pièces seraient exécutées et assemblées avec une grande précision, et où l'on aurait, en outre, pris des dispositions convenables pour maintenir l'uniforme répartition des efforts que ce système a pour but de réaliser, comporte un emploi beaucoup plus étendu de la matière, et présente plus de chance de durée, qu'une ferme à treillis rivé d'une exécution également parfaite.

« En fait, les ponts américains réalisent sur les ponts européens de même portée, ainsi qu'on peut le voir par le tableau qui termine ce chapitre, une économie très sensible de métal pour les grandes ouvertures.

« Mais si la légèreté des ponts américains a des inconvénients pour les ponts de faible portée, il resterait à savoir si cette infériorité n'est pas amplement compensée par les meilleures conditions dans lesquelles ils sont placés pour résister à l'oxydation, par suite de l'emploi de pièces offrant moins de prise aux agents atmosphériques, et plus de facilités pour la visite et l'entretien. »

D'après tout ce qui précède, on voit que les Américains ont généralement substitué dans la construction de leurs ouvrages le système articulé au système rigide qui domine en Europe, et qu'ils ont obtenu une économie notable dans la dépense de construction.

CHAPITRE VI.

FONDATIONS.

Le chapitre VI contient la description des systèmes de fondations, depuis les systèmes les plus expéditifs (cribs) jusqu'aux procédés les plus intéressants et les plus laborieux auxquels on a dû avoir recours sur des fleuves dont le fond est très mobile et s'affouille à de grandes profondeurs.

L'emploi du bois dans les fondations, même lorsqu'elles sont effectuées à l'air comprimé, est tout à fait particulier aux Américains.

CHAPITRE VII.

SOUTERRAINS.

L'art de construire les souterrains ne présente aucune particularité digne de remarque en Amérique. Le trait le plus original de ces ouvrages, c'est le revêtement provisoire en bois dont les compagnies de chemins de fer se contentent pour les souterrains à une voie jusqu'au jour où les bénéfices de l'exploitation leur permettent de le remplacer par un revêtement en maçonnerie.

Les difficultés que présenterait souvent le transport des matériaux nécessaires pour exécuter de la maçonnerie justifie parfaitement cette disposition économique; l'emploi du bois dans le revêtement des souterrains rappelle le système des estacades sur lesquelles les Américains traversent les vallées en attendant qu'ils aient pu exécuter des ponts en maçonnerie ou en fer.

Le général Saint-Joln, ingénieur en chef du Chesapeake et Ohio, estime qu'un revêtement en bon bois (chêne blanc)

peut durer huit ans en moyenne; cette durée se réduit à trois ans dans les souterrains humides et mal ventilés.

En général, on donne aux souterrains revêtus en bois une largeur de 5m,80 pour permettre l'exécution des voûtes à l'intérieur même du revêtement provisoire.

La hauteur des souterrains est presque toujours portée à 6 mètres afin de faciliter la ventilation.

Pour le grand souterrain de Hoosac, qui a une longueur de 7.645 mètres, c'est également pour faciliter la ventilation qu'on lui a donné une largeur variant de 7m,32 à 7m,94, l'importance du trafic ne faisant pas prévoir la nécessité de poser un jour une deuxième voie. On a cru devoir ouvrir un puits central de 314 mètres de profondeur (*), afin de provoquer l'expulsion rapide des gaz délétères.

Quelques souterrains sont en courbe de 175 mètres; on leur donne, dans ce cas, un excédant de largeur; le souterrain de Saint-Louis (**), établi sous Washington-avenue, présente une courbe de 152m,50.

En ce qui concerne l'application des perforatrices mécaniques, les Américains se sont toujours laissé devancer par les ingénieurs européens; nous ne nous arrêterons pas plus longtemps snr ce chapitre et nous terminerons notre analyse en reproduisant un tableau qui donnera les principales conditions d'établissement de trois souterrains américains et des souterrains du Mont-Cenis et du Saint-Gothard:

(*) Le percement de ce puits n'a pu être effectué que dans un délai de six ans et demi, du 1er janvier 1864 au 1er août 1870. L'exécution du souterrain a duré vingt-deux ans, de 1834 à 1876; il a coûté 6.726 francs par mètre courant.

(**) Le souterrain de Saint-Louis a coûté 4.000 francs le mètre courant, y compris indemnités de toute nature.

INDICATION	MUSCONETCONG	HOOSAC	SUTRO	MONT-CENIS	ST-GOTHARD
Nature des terrains traversés	Syénite	Micaschistes et gneiss	Syénite	Calcaires, schistes talqueux, quartz.	Gneiss, micaschistes.
Position de la galerie d'avancement	Haute	Haute et basse	Haute	Basse	Haute
Dimensions. Largeur	7m,90	7m,32	3m,05	2m,89	2m,40
Dimensions. Hauteur	2m,30	2m,60	2m,44	2m,60	2m,50
Superficie de la galerie d'attaque	19m²,11	18m²,30	7m²,44	7m²,54	6m²,00
Nombre de machines employées à la fois au percement de la galerie d'attaque	6	6	4 à 6	9	6 à 8
Nombre de trous forés dans le front d'attaque pour chaque tir de mines	36	35 à 40	18	70 à 80	13 à 18
Diamètre des trous	0m,037 à 0m,067	0m,05	0m,05 à 0m,06	0m,03 à 0m,04	0m,04
Profondeur moyenne	3m,10	3m,55	2m,06	0m,80 à 1m,00	1m,10
Système de perforatrices	Ingersoll	Burleigh	Burleigh	Sommeilier et François	Mackean et Ferroux
Nombre de coups battus par minute	120	120	120	260 à 270	180
Matière explosible	Dynamite	Dynamite	Dynamite	Poudre	Dynamite
Nombre d'ouvriers employés à la fois à l'avancement	19	18 à 20	12 par relais de 8 heures	44 par relais de 12 heures	18 à 22 par relais de 8 h.
Avancement moyen par jour et par attaque	1m,16	0m,40	2m à 3m,60	1m,45	3m,00

CHAPITRE VIII.

ABRIS CONTRE LA NEIGE.

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, que les Américains, dans leurs tracés de chemins de fer, ont une tendance à relever la ligne, de manière à réduire la longueur des souterrains et la profondeur des tranchées.

Dans les régions où la neige peut créer un obstacle sérieux à la circulation, les Américains maintiennent leurs tracés en remblais, autant que faire se peut, et ils élargissent la plate-forme des tranchées pour pouvoir se débarrasser de la neige qui s'éboule dans les fossés ou que le chasse-neige retrousse de chaque côté de la voie.

On sait que les amoncellements de neige les plus dangereux sont créés par le vent qui, balayant les terrains

cultivés, la chasse avec violence dans les tranchées. On s'en garantit au moyen d'écrans inclinés ou de galeries en bois.

Mais les écrans remplissent rarement leur but et tendent à disparaître. Les expériences que nous avons faites à ce sujet dans le voisinage du Lioran nous ont donné le même résultat.

Les galeries en bois sont exécutées de manière à laisser un vide à travers les bordages latéraux à une certaine distance du sol, et elles sont recouvertes d'une lanterne à jour afin d'assurer la ventilation.

De distance en distance (de 400 à 800 mètres), les revêtements en bois sont interrompus par des revêtements en tôle galvanisée, pour empêcher les incendies de se propager sur de trop grandes longueurs. Entre Strong's Canon et la station d'Emigrant Gap, sur un parcours de 44 kilomètres, les galeries règnent d'une manière continue sans autre interruption que le passage des ponts et des tunnels.

Grâce à l'emploi de ces galeries couvertes, les Américains ont pu franchir des chaînes de montagnes très élevées, et éviter la construction de longs souterrains dont l'exécution aurait retardé l'ouverture de la ligne du Pacifique.

Cette solution, conforme à l'esprit hardi et pratique des Américains, aurait pu être utilement imitée dans quelques circonstances en Europe.

CHAPITRE IX.

CLÔTURES ET PASSAGES A NIVEAU.

Dès l'origine, les chemins de fer n'étaient pas clos et les passages à niveau n'étaient pas fermés par des barrières.

Mais comme à côté de la liberté se trouve le correctif de la responsabilité, les compagnies qui sont responsables des accidents, lorsque le chemin de fer n'est pas clos, se sont vues dans l'obligation d'établir des clôtures et de mettre des gardiens aux passages à niveau, comme en Europe, lorsque les contrées se sont peuplées, et que les villes, créées aux environs des stations, ont pris un grand développement.

Les clôtures ont donc plutôt pour but de garantir les compagnies contre les demandes d'indemnités pour bétail tué ou blessé, que de prévenir les accidents et de satisfaire aux exigences de la réglementation.

Il y a, en France, des contrées peu peuplées où on pourrait, comme en Amérique, se dispenser de clore la ligne, et de faire des dépenses considérables pour la garder.

Les Américains empêchent le bétail de pénétrer sur la voie, en établissant des cattle-guards: ce sont des fossés à parois verticales établis de chaque côté du passage à niveau.

CHAPITRE X.

VOIE.

On verra dans ce chapitre que si la liberté absolue a des inconvénients graves, elle a aussi des avantages tels qu'elle porte en elle-même son propre correctif, et qu'elle fait disparaître promptement les erreurs ou les abus.

Les inconvénients résultant pour les transports à longue distance de l'établissement des voies avec une largeur variable saute aux yeux de tout le monde.

Grâce à la liberté absolue dont jouissent les États, grâce à cet esprit dégagé de préjugés qui caractérise l'Américain, les ingénieurs se sont donné libre carrière à

ce point de vue. Et, soit pour créer un instrument en harmonie avec les besoins à desservir, soit pour obéir à une arrière-pensée politique, soit par esprit de rivalité et de jalousie, ils ont adopté des voies présentant les largeurs les plus variées, 1,678, 1,525, 1,474, 1,449, 1,435, 1,068, 0,915.

Mais l'expérience fait ramener presque toutes les lignes à la largeur normale, 1^m,435, partout où les exigences du trafic et du service l'imposent; quelques compagnies ont effectué cette transformation en posant un troisième rail; la plupart ont déplacé l'un des deux rails. Ainsi, le 22 juillet 1871, la compagnie de l'Ohio-Mississipi effectua cette transformation en vingt-quatre heures sur une longueur de 547 kilomètres. Sur le chemin de fer canadien du Grand-Trunk, la même transformation s'est accomplie le 3/4 octobre 1873, sur une longueur de plus de 900 kilomètres en vingt-sept heures.

On avait échelonné 8.000 ouvriers spéciaux le long de la voie pour effectuer ce travail avec une célérité vraiment extraordinaire.

Les ingénieurs qui n'ont pas craint d'employer le bois pour construire leurs viaducs et blinder leurs souterrains n'ont pas hésité à livrer à la circulation des lignes dont les voies étaient établies dans les conditions d'imperfection d'une voie de terrassement, se réservant de les améliorer peu à peu au fur et à mesure des exigences du trafic.

Aussi, trouvera-t-on dans l'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen des indications très intéressantes sur les chemins de fer les plus économiques, pour ne pas dire les plus rudimentaires, comme sur les chemins de fer les plus perfectionnés.

L'absence de réglementation, en ce qui concerne la largeur de la voie, se manifeste, à plus forte raison, en ce qui concerne l'écartement des voies.

Lorsque le trafic exige l'établissement d'une deuxième voie et que les ressources manquent pour transformer les grands viaducs construits pour une seule voie, les Américains ne craignent pas de maintenir la voie unique sur ces passages; et, pour supprimer l'inconvénient résultant de l'établissement de deux aiguilles aux extrémités de l'ouvrage, ils établissent les deux voies avec un écartement de 0,15 à 0,20 seulement d'axe en axe; les deux changements de voie étant remplacés par deux croisements, ils maintiennent la continuité de chaque voie.

La seule gêne qu'ait à subir l'exploitation consiste à ne pas laisser engager un train sur la section à profil restreint avant de s'être assuré que la voie est fermée aux trains marchant en sens contraire.

Ballast. — C'est guidés par les mêmes considérations que les ingénieurs américains ont posé leurs traverses sur le terrain naturel, attendant, pour interposer une couche de ballast, que le trafic de la ligne mît de nouvelles ressources à leur disposition.

L'expérience des Américains vient confirmer l'expérience que nous avons acquise dans une carrière déjà longue, en ce qui concerne les conditions les plus indispensables pour assurer la stabilité des voies, et les qualités qu'on doit rechercher pour le ballast.

Ce n'est pas le petit prisme de ballast pesant sur la traverse, ou buttant leurs extrémités, qui s'oppose sérieusement au déplacement de la traverse, c'est le frottement de la traverse sur la face d'appui.

La théorie que nous professons depuis six ans à cet égard est parfaitement confirmée par la pratique des Américains sur les voies les plus rudimentaires, et par la pratique des Anglais sur les voies les plus perfectionnées et les plus chargées.

Le bois ayant peu de valeur en Amérique, on a été naturellement conduit dès l'origine à augmenter la surface d'appui en multipliant les traverses et avec d'autant plus de raison que la ligne était plus imparfaite. L'écartement a été généralement fixé à $0^m,61$ d'axe en axe. Quelques ingénieurs américains l'ont même réduit à $0^m,50$, les traverses ayant une largeur de $0^m.20$ à $0^m,25$.

Les Américains ayant adopté presque généralement le rail à patin se sont vus dans la nécessité d'exclure les traverses en sapin.

Rails. — Le poids des rails est généralement de 29 à 30 kilogrammes par mètre courant. La substitution de l'acier au fer se poursuit partout en Amérique comme en Europe. La longueur des rails est en général de $9^m,15$ (30 pieds): ce n'est pas la difficulté du laminage qui a fait adopter cette longueur, puisque les usines font généralement les loupes pour trois longueurs ; mais c'est la question du réglage de la dilatation sous l'influence des grandes variations de température (80°) auxquelles les rails sont exposés.

Nous ne signalerons, parmi les épreuves auxquelles on soumet les rails dans les usines, que l'épreuve relative à la dureté de la surface de roulement.

Un ciseau, pesant 18 kilogrammes et dont la tranche présente la forme d'un demi-cercle, tombe d'une hauteur de $1^m,25$ sur la face supérieure du champignon.

L'empreinte faite par la tranche du ciseau est plus ou moins longue, suivant que l'acier est plus ou moins tendre.

La somme des longueurs d'un certain nombre de ces empreintes permet de comparer, au point de vue de la dureté, les diverses fournitures des rails.

La multiplicité infinie des combinaisons essayées pour éclisser le rail à base plate, et pour le fixer sur la tra-

verse, prouve que cette forme de rails laisse beaucoup à désirer au point de vue de la stabilité et de l'uniformité de résistance. L'expérience des compagnies anglaises et des compagnies françaises qui ont expérimenté le rail à base plate et le rail à coussinet est confirmée par les difficultés qu'éprouvent les Américains pour trouver, au point de vue de l'attache, une solution satisfaisante.

En général, les Américains font chevaucher les joints des rails, comme la plupart des ingénieurs européens. Nous n'attachons pas une grande importance à ce détail, parce que nous admettons qu'avec un éclissage bien étudié et bien entretenu, la continuité du rail doit être considérée comme absolue. Nous appellerons l'attention, en passant, sur un détail qui présente une certaine originalité : c'est que les ingénieurs ont dû rechercher les moyens les plus efficaces pour empêcher les boulons d'éclisses de se desserrer, non pas pour obtenir une voie plus solide, mais pour empêcher les malfaiteurs de voler le petit matériel ou de faire dérailler les trains pour piller les voyageurs.

Changement de voie. — Le changement de voie à rails interrompus, qui n'est employé en Europe que sur les chantiers de terrassements, est généralement adopté en Amérique ; mais lorsque la circulation prend une certaine activité, les ingénieurs américains lui substituent le changement Wharton, qui est constitué de manière à supprimer toute solution de continuité sur les rails de la ligne principale.

Le mécanisme est ingénieux, et il pourrait trouver son application en Europe ; mais il faut que les bandages aient une largeur de $0^m,13$ à $0^m,14$.

Afin de maintenir la continuité du rail de la voie principale, même au droit du croisement, les Américains ont imaginé des croisements pour lesquels une des branches

de la patte-de-lièvre est maintenue par un ressort contre la pointe-de-cœur. Lorsqu'un train passe de la voie accessoire sur la voie principale, le ressort cède et la patte-de-lièvre se déplace afin de livrer passage au boudin des roues.

Les autres détails relatifs à la voie ne présentent pas d'intérêt. Nous dirons cependant que les Américains ont soin de placer un contre-rail intérieur dans les courbes de faible rayon : c'est une pratique que nous avons eu occasion de remarquer sur le métropolitain de Londres et sur les lignes les plus accidentées de l'Écosse.

Sur les ponts (et notamment pour les lignes métropolitaines), les ingénieurs américains mettent presque toujours deux longrines en bois armées d'une cornière, pour maintenir les trains sur les plate-formes en cas de déraillement.

Nous avons dit que les chemins de fer, aux États-Unis et au Canada, sont construits avec des largeurs de voie très différentes ; pour simplifier l'opération du transbordement résultant de cette situation, les ingénieurs américains ont imaginé des procédés très ingénieux qui pourraient être appliqués en France aux points de jonction des chemins de fer d'intérêt général avec les chemins de fer d'intérêt local à voie étroite.

Le matériel roulant des Américains donne, à ce point de vue, des facilités spéciales, auxquelles il faut renoncer avec notre matériel rigide ; on sait que la plupart des wagons et des voitures américaines se composent d'une caisse posée sur deux trucks et maintenue par une cheville-ouvrière et deux chaînes de garde ; rien de plus simple que de substituer un truck de $1^{m},435$ à un truck de $0^{m},91$ soit en soulevant la caisse, soit en abaissant le uck ; l'opération est très rapide, grâce aux engins méniques spéciaux appropriés à chaque circonstance ; les agons ne sont pas dérangés et les marchandises ne su-

bissent pas les détériorations qui résultent pour quelques-unes du chargement et du déchargement.

Nous ne rappellerons pas les dispositions prises pour le transbordement du charbon, parce qu'elles sont généralement appliquées en Europe.

Pour les grains, on sait qu'ils sont emmagasinés à leur arrivée dans de vastes entrepôts (grains elevators) formés d'une série de trémies juxtaposées, de 15 à 20 mètres de hauteur, au sommet desquelles le grain est élevé au moyen de chaînes à godets ou chapelets prenant le blé dans le wagon ou dans le bateau.

Le chargement pour la réexpédition se fait en laissant le grain s'écouler par les trémies, pour être mis en sac.

On a créé des élévateurs pouvant contenir 500.000 hectolitres de blé.

Ces grands emmagasinements dans les dépendances de la gare s'effectuent, non seulement pour la houille et pour les grains, mais pour toutes les marchandises dont le trafic est important ; ils ont principalement pour but de rendre les arrivages et les expéditions complètement indépendants les uns des autres, afin de réduire autant que possible le chômage des wagons.

Les ingénieurs américains ne craignent pas de surmener leur matériel, contrairement à ce qui se passe en France et en Europe ; ils paraissent n'avoir qu'une préoccupation, c'est de ne pas lui laisser le moindre repos, c'est de l'utiliser constamment, au risque de le voir dépérir plus promptement.

CHAPITRE IX.

GARES ET STATIONS.

Les dispositions des gares et stations dépendent évidemment du système d'exploitation adopté et le systèm

d'exploitation est presque toujours la conséquence des mœurs commerciales des pays.

Sur le continent européen, on tient généralement à tout réglementer; or, ce qui caractérise le règlement c'est son inflexibilité; il est le même dans toutes les circonstances et sur tous les points.

En Amérique, nous nous trouvons, au contraire, dans le pays de la liberté absolue; aussi, ne fait-on que ce qui est absolument indispensable dans chaque cas particulier pour atteindre le but qu'on a en vue. On ne se laisse pas arrêter par les difficultés; on commence par les tourner, sauf à venir les attaquer de front plus tard. Le matériel si flexible des Américains est un peu l'image de leur caractère et de leur administration.

Si pour traverser les immenses contrées désertes dont les richesses naturelles ne pouvaient être exploitées qu'après la création des voies de communication, les Américains avaient exigé que les installations des chemins de fer fussent analogues à celles qu'on trouve dans les pays civilisés, il leur aurait fallu deux siècles pour conquérir leur sol.

Rien de plus simple que l'établissement primitif d'une gare. Bâtiments, voies, appareils, tout semble provisoire et rappelle les installations de nos chantiers de terrassements.

Plus tard, lorsque les produits arriveront à la station, on donnera à la gare tels développements que les circonstances exigeront.

Avant tout, il faut marcher, franchir l'espace; les kilomètres se déroulent à l'infini; les voyages à travers les plaines deviennent de plus en plus longs; il faut que l'Américain trouve dans son wagon tout ce qui est nécessaire à la vie; de là, la construction de ces immenses voitures qui ressemblent à des hôtels ambulants.

Plus tard, lorsque les villes se créeront et se dévelop-

peront autour de la gare, les hôtels s'annexeront aux gares mêmes, et c'est dans l'hôtel même que se fera le service de la gare (distribution de billets, enregistrement des bagages, etc.).

La nécessité de construire dès l'origine des maisons ambulantes pour traverser les plaines, et de donner aux voitures une grande longueur, a naturellement conduit l'ingénieur américain à supprimer les manœuvres par plaques tournantes et à les remplacer par des changements de voie; la main-d'œuvre étant très chère, il fallut réduire à la dernière limite le personnel des gares et utiliser les machines pour les compositions et les décompositions de trains.

L'histoire des chemins de fer américains explique tout naturellement les dispositions des gares.

L'espacement considérable de quelques-unes d'entre elles a imposé l'obligation d'établir des haltes intermédiaires sur les points où l'on trouve de l'eau de bonne qualité pour l'alimentation des machines, sur les points où l'on rencontre une mine de charbon récemment ouverte, une forêt nouvellement exploitée pour permettre de compléter le chargement du tender.

L'ouvrage de MM. Lavoinne et Pontzen donne à cet égard mille détails intéressants qui, s'ils étaient mieux connus, feraient disparaître bien des préjugés, et permettraient d'établir des lignes de chemins de fer en pays accidenté sans dépenses exagérées.

Grâce à leur matériel flexible, les Américains peuvent adopter, dans leurs grandes gares, des dispositions qui en facilitent singulièrement l'exploitation.

Avec les courbes de 50 mètres de rayon sur lesquelles leurs wagons circulent sans difficultés, on peut résoudre bien des problèmes qui présentent, en France, des difficultés inextricables, tout en entraînant l'administration dans des dépenses exagérées. Nous rappellerons, à ce

sujet, la boucle complètement fermée qui a été construite, en 1876, devant la gare spéciale de l'exposition universelle de Philadelphie, et qui a permis aux trains de se succéder à de courts intervalles sans la moindre complication de service.

Nous terminerons nos observations relatives aux dispositions générales des gares, en rappelant que les Américains emploient depuis longtemps ces longues traversées obliques, se croisant en forme d'x, qui rendent de si grands services pour les manœuvres à la machine.

Les dispositions intérieures des bâtiments sont en harmonie avec les mœurs du pays. Ainsi, nous remarquons des salles d'attente spéciales pour les dames dans presque toutes les gares, et un service spécial pour l'approvisionnement de la glace dans les salles d'attente et dans les voitures.

Quant au service des bagages, il n'a pas le développement qu'on lui donne en Europe, parce que c'est dans les hôtels et dans les bureaux spéciaux de la ville que se fait généralement l'enregistrement des bagages, parce qu'il n'y a pas d'octroi à l'entrée des villes.

MM. Pontzen et Lavoinne ont donné, à la fin du chapitre XI, des détails intéressants sur quelques procédés employés pour assurer l'alimentation des machines; ici, ce sont des puits artésiens dont la profondeur atteint 400 mètres; là, ce sont des pompes mises en mouvement par des moulins à vent dont les ailes s'orientent automatiquement, et qui présentent une surface plus ou moins grande, suivant l'intensité même du vent; plus loin, ce sont des rigoles horizontales de 200 à 400 mètres de longueur établies sur l'axe de la voie et dans lesquelles le mécanicien puise de l'eau sans arrêter la marche du train.

CHAPITRE XII.

SIGNAUX.

Quant aux signaux qui font l'objet du chapitre XII, les chemins de fer américains ne donnent lieu à aucune observation originale; les signaux sont à l'état rudimentaire sur les lignes à faible trafic.

Sur les lignes de grande circulation, au contraire, on applique, comme en Europe, le block system, ainsi que les appareils si ingénieux de MM. Saxby et Farmer; M. Rousseau, ingénieur canadien, a imaginé un appareil qui permet au train de fermer automatiquement la section dans laquelle il entre, et d'ouvrir la section qu'il vient de quitter. Le commutateur électrique de M. Rousseau, placé sous le rail entre deux traverses, fonctionne avec succès depuis 1876, et mérite d'être signalé à l'attention des ingénieurs. Tous les signaux sont d'ailleurs mis en communication avec un indicateur placé dans le bureau du chef de la gare la plus voisine, et cet indicateur reproduit au moyen de petits disques la position des signaux sur la voie.

CHAPITRE XIII.

PRIX DE REVIENT.

MM. Lavoinne et Pontzen ont essayé de donner quelques renseignements sur les prix de revient des chemins de fer américains.

Mais il ne faut pas attacher à ces documents une importance absolue, parce que les compagnies américaine ne sont pas tenues de faire connaître exactement leur situation; ils montrent cependant que les travaux de pa-

rachèvements définitifs ont généralement doublé et même triplé le montant des dépenses faites ou accusées au moment de l'ouverture d'une ligne; ils montrent que si quelques lignes ont pu être exécutées moyennant 61.700 fr. par kilomètre, les dépenses par kilomètre ont atteint le chiffre de 480.000 francs sur plusieurs réseaux.

Le taux élevé des intérêts (8 à 10 p. 100) fut pour les compagnies américaines une lourde charge, et c'est pour la réduire qu'elles se sont vues dans la nécessité absolue d'imprimer à leurs travaux une célérité exceptionnelle et de livrer à l'exploitation des lignes imparfaites.

Paris, le 7 mai 1886.

N° 52

NOTE

SUR LA

DISTRIBUTION DES EAUX DE LA NESTE

TRAVAUX DU RÉSERVOIR D'ORÉDON

Par M. MICHELIER, Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

Objet de la distribution des eaux de la Neste. — Le réservoir d'Orédon fait partie d'un ensemble de travaux ayant pour but la distribution des eaux de la Neste ; et cette distribution a pour objet l'amélioration agricole et industrielle de la région située au pied des Pyrénées, et formée par les nombreuses vallées qui ont pour commune origine le plateau de Lannemezan.

Dans cette région limitée à l'est et au nord par la Garonne, à l'ouest par le département des Landes et l'Adour et au sud par le plateau de Lanremezan, la Neste et la Garonne, les rivières sont à sec en été, les moulins chôment, et les habitants manquent d'eau pour abreuver leurs bestiaux et pour les usages les plus ordinaires de la vie.

Les travaux de distribution consistent en un canal de dérivation pouvant débiter 7 mètres cubes par seconde, dont la prise d'eau est à Sarrancolin, et qui porte les eaux de la Neste sur le plateau de Lannemezan, en rigoles secondaires portant les eaux du canal à l'origine de chaque vallée, et, enfin, en réservoirs artificiels desti-

nés à alimenter le canal pendant les basses eaux de la Neste.

Le canal et les rigoles de distribution sont construits et les eaux de la Neste, introduites sur le plateau de Lannemezan et dans les vallées desséchées dont l'origine remonte à ce plateau, ont fait cesser l'ancienne détresse des habitants et lui ont substitué l'aisance et les avantages qui s'attachent au voisinage des eaux courantes.

Le réservoir d'Orédon qui vient d'être terminé est le premier des réservoirs projetés pour suppléer à l'insuffisance des eaux de la Neste pendant le bas étiage de cette rivière.

La capacité du réservoir est d'environ 7.269.000 mètres cubes.

Le volume total des réserves artificielles à créer pour assurer l'alimentation du canal dérivé de la Neste, pendant le bas bas étiage de cette rivière, n'est pas inférieur à. 23.000.000 de mètres cubes. Il reste donc à réaliser des retenues jusqu'à concurrence d'environ. . . . . . . 16.000.000 de mètres cubes.

Pour continuer l'œuvre commencée, on a proposé d'augmenter la capacité du réservoir et de la porter à. . . . . 17.000.000 de mètres cubes en exhaussant le barrage actuel.

Travaux du réservoir (Voir le plan et les profils, Pl. 34). — Nous allons décrire rapidement les travaux qui ont permis de transformer le lac d'Orédon en réservoir, puis nous passerons à l'objet principal de la première partie de notre travail, qui est l'étude de l'alimentation du réservoir (*).

(*) L'étude de l'alimentation du réservoir forme la première partie d'un mémoire inséré dans les *Annales du Bureau central météorologique*, publiées en 1887.

Le lac d'Orédon verse ses eaux dans la vallée de la Neste, qui les conduit à la Garonne. Il est situé près de la ligne de partage des eaux de la Neste et du Gave-de-Pau; il est à peu près sur l'axe du soulèvement des Pyrénées et en pleine région granitique. Il est à 1.852 mètres au-dessus du niveau de la mer; sa superficie est d'environ 24 hectares.

Il reçoit le tribut des lacs de Cap-de-Long, des Laquettes, d'Aubert et d'Aumar et des glaciers de Néouvieille et du Pic-Long. Les cimes qui l'environnent s'élèvent à plus de 3.000 mètres au-dessus du niveau de la mer et sont couvertes de neige les trois quarts de l'année.

Les travaux qui ont transformé le lac d'Orédon en réservoir consistent principalement :

1° En une tranchée ouverte dans le déversoir naturel du lac;

2° En un barrage établi en travers du déversoir naturel.

La tranchée permet d'abaisser le niveau de l'eau dans le réservoir à 7 mètres en contre-bas de l'ancien niveau naturel du lac; le barrage permet d'élever les eaux à 17 mètres en contre-haut de ce même niveau. La tranche d'eau disponible a donc une épaisseur totale de 24 mètres.

Tranchée. — La tranchée ouverte dans le déversoir naturel du lac a 7 mètres de profondeur maxima et 480 mètres de longueur dont 167 mètres dans le lac et 313 mètres dans le déversoir même. Elle est creusée dans le granit.

Pour faciliter les déblais de la tranchée, on a établi, à l'origine du déversoir, une chaussée en terre de $3^{m},50$ de hauteur au-dessus du niveau du lac. A l'extrémité rive droite et au point où cette chaussée touche au rocher,

RÉSERVOIR D'ORÉDON._DÉTAI

Appareil de Manœuvre

Coupe suiv.t l'axe de vidange

Manivelle

Galerie d'accès

Tige de manœuvre

Voûte

Coupe de l'appareil de prise d'eau

bitume

Béton

Chape en

un pertuis de 3 mètres de largeur, fermé avec des poutrelles, permet de retenir et de lâcher à volonté les eaux du lac.

Après l'explosion des mines, et surtout le soir, on ouvrait le pertuis ; un courant puissant produisait une véritable chasse et balayait vers la cascade qui termine la tranchée la plus grande partie des blocs détachés par les mines.

Appareil de prise d'eau. — L'appareil de prise d'eau se compose de onze conduites en fonte de 30 centimètres de diamètre terminées en aval par des robinets-vannes de même dimension, dont le type a été emprunté à la distribution des eaux de Paris. Du côté d'amont, chaque conduite se termine par un tuyau évasé dont le diamètre atteint 60 centimètres.

Les conduites sont enchâssées au bas d'un massif de béton de ciment de Portland de 8 mètres d'épaisseur et de 7 mètres de hauteur. Elles sont disposées sur deux rangs, cinq au rang inférieur et six au rang supérieur.

On arrive aux robinets par l'aval en suivant une galerie voûtée dite d'accès, superposée à un aqueduc dans lequel débouchent les robinets, et portant, sur toute sa longueur, le poids du barrage.

Barrage. — Le barrage consiste essentiellement en un remblai muni, sur son talus amont, d'un revêtement en béton qui est garanti de la gelée par un perré en pierres sèches de 1 mètre d'épaisseur.

Construction du remblai. — On a commencé par préparer l'assiette du remblai en enlevant les arbres, les broussailles et toute la terre végétale : on a fouillé sous les grands blocs qu'on n'a pu remuer, pour mettre partout à nu le roc vif, puis on a entrepris l'opération importante du remblai.

Un chemin de fer a relié la Prade-de-Camou, lieu d'emprunt des remblais, avec le sommet du barrage. Ce chemin se compose de deux voies qui forment un circuit fermé : l'une supérieure ou voie d'arrivée, descend par une pente de 10 à 11 millimètres du champ d'attaque des déblais vers le point culminant du barrage. La voie de retour part de ce dernier point et se dirige par une pente inverse vers la Prade-de-Camou, où elle arrive à 7 mètres en contre-bas du point de départ de la voie supérieure. Cette différence de niveau est rachetée par un plan incliné sur lequel une chaîne sans fin, mise en mouvement par une roue hydraulique, remonte les wagons employés au transport des matériaux. Les pentes des voies ferrées sont ménagées de manière qu'un wagon mis en marche continue à descendre avec une vitesse modérée, soit du chantier des déblais vers le barrage, soit du barrage vers le pied du plan incliné. Chaque wagon est muni d'un frein dont le conducteur se sert au besoin pour en régler la marche.

Traitement des remblais par l'eau. — L'agent principal employé dans la construction du remblai a été l'eau, et voici par quel procédé :

On a établi, dans le fossé qui longe à gauche la voie ferrée supérieure, un courant d'eau d'environ 15 litres par seconde ; cette eau provenant du canal qui met en jeu la roue hydraulique employée au remontage des wagons vides sur le plan incliné.

Arrivée au barrage, l'eau pouvait à volonté, par la manœuvre d'une vanne, être jetée dans une conduite en bois de 16 sur 22 centimètres placée à 80 centimètres au-dessous des rails sur lesquels arrivaient les wagons chargés. La conduite, que l'on prolongeait à mesure de l'avancement du remblai, débouchait au point où chaque wagon, en basculant, laissait tomber son chargement.

On déchargeait deux et quelquefois trois wagons ; la buse se trouvait ainsi recouverte de 3^{mc},500 à 5 mètres cubes de terre ; on lançait l'eau dans la conduite ; celle-ci, établie avec une pente d'environ 5 millimètres par mètre et ayant son extrémité aval bouchée par le remblai, se chargeait rapidement. La masse de terre, pénétrée par l'eau, passait à l'état de lave plus ou moins pâteuse, puis l'eau, se faisant jour au travers, précipitait, avec un fracas assourdissant, la terre, le sable, les pierrailles et les blocs vers la base du remblai.

Un atelier de quatre ou cinq hommes, munis de crochets en fer, détournait au besoin les grosses pierres et dirigeait le courant successivement à droite, à gauche ou en face, de manière à mener de front le talus amont et le talus aval. Le talus d'amont était réglé en même temps par un perré à pierres sèches.

L'eau courant au pied du remblai, après avoir laissé en route les parties solides qu'elle avait entraînées, s'écoulait à droite où à gauche dans la tranchée, n'emportant en suspension que de l'humus léger et du sable fin à l'état de vase.

Au bout de quelques minutes, les matériaux déposés par l'eau, et en quelque sorte sous l'eau, avaient perdu le liquide qui leur avait servi de véhicule. Le sable s'était logé dans les moindres interstices laissés par les fragments de plus fortes dimensions. Aucun vide n'apparaissait et la masse entière était tellement résistante qu'aucun tassement ne semblait plus possible. L'expérience a en effet démontré qu'ainsi construit, le remblai était absolument incompressible. C'est là un résultat capital.

Revêtement en béton. — Le revêtement en béton a pour but d'empêcher l'infiltration de l'eau à travers le remblai et d'assurer par là sa résistance ; mais ce revêtement, si compact qu'il soit, si hydraulique que soit

l'excellente chaux du Theil qui entre dans sa composition, est lui-même perméable comme toute maçonnerie. Des fissures provenant soit du retrait du mortier, soit des tassements du remblai ou du béton, peuvent se déclarer et livrer passage à l'eau. On a essayé d'en neutraliser l'effet à l'aide d'une chape bitumineuse.

Mais ce n'est pas encore suffisant : la chape peut se gercer et l'action destructive de l'eau, sous l'énorme pression que supportera le talus d'amont du barrage, reste encore à craindre.

Système de drainage. — On a cherché à écarter ce danger en interposant un drain général entre le remblai et le revêtement.

Le perré qui forme le talus amont du remblai est recouvert d'une couche de béton de 20 centimètres. Sur cette couche est établi un perré à pierres sèches de 30 centimètres d'épaisseur uniforme qui constitue le drain. C'est sur ce dernier perré qu'est appliqué le revêtement en béton avec sa chape bitumineuse.

Au pied du talus, à droite et à gauche du massif qui contient les conduites de prise d'eau, est pratiqué un drain collecteur ménagé à la base du revêtement en béton et communiquant avec le drain général par des barbacanes espacées de deux en deux mètres. La position des barbacanes est repérée à l'extérieur; s'il survient une fissure dans le revêtement principal, il suffira de suivre, pour la trouver, la ligne de plus grande pente qui aboutit à la barbacane dont le débit exceptionnel accuse l'existence de la fissure.

Les drains collecteurs versent leurs eaux dans la galerie qui donne accès aux robinets, et de là dans l'aqueduc inférieur. Ils s'élèvent à droite et à gauche jusqu'au sommet du barrage, passent sous son couronnement et vont déboucher sur le talus aval du remblai. Ils mesu-

rent 1 mètre de largeur et $1^m,50$ de hauteur verticale sous clef. Un homme peut les parcourir sans trop de difficulté. Ils ont pour radier le roc vif.

Les drains collecteurs, encore à l'état d'amorces, ont joué un rôle important pendant la construction du remblai, en suppléant, comme moyen d'écoulement, à l'insuffisance de l'appareil de prise d'eau au moment d'une crue rapide du lac.

Construction du revêtement en béton. — Le sable et le gravier nécessaires au béton proviennent, ainsi que les terres du remblai, de la Prade-de-Camou ; ils sont lavés sur place à l'eau courante, dosés et mis en dépôt.

Le mélange de sable et gravier est chargé sur wagons, porté sur le barrage et déposé sur des plates-formes en charpente disposées le long de la voie ferrée et sur lesquelles le béton se fabrique ; pour ce nouveau service, on se sert de wagons à terrassements modifiés de manière à verser, non en avant, mais de côté.

Dans un des angles de chaque plate-forme est pratiqué un trou carré de $0^m,30$ de côté auquel correspond un manchon vertical en planches de $2^m,50$ de hauteur, où s'échelonnent de $0^m,25$ en $0^m,25$ des barreaux de fer horizontaux de $0^m,02$ de diamètre dont les directions s'entre-croisent.

Cet ensemble constitue une bétonnière. Les bétonnières sont espacées moyennement de 16 mètres de milieu en milieu.

L'extinction de la chaux se fait sur la plate forme. L'eau nécessaire à cette opération est puisée dans des cuves en bois placées entre les voies d'arrivée et de retour des wagons, en face de chaque bétonnière. Toutes ces cuves sont maintenues constamment pleines par une conduite en bois de $0^m,05$ de hauteur sur $0^m,10$ de largeur, embranchée sur le fossé latéral à la voie d'arrivée ; l'excès

d'eau se déverse de la dernière cuve sur le talus d'aval du remblai.

La chaux en pâte est répandue sur une couche dosée de sable et de gravier, épaisse de $0^m,15$ environ. On donne un tour de pelle pour commencer le mélange et l'on jette ensuite la matière dans le manchon, où le mélange s'achève.

Le béton ainsi fabriqué tombe dans un couloir en planches, dont la pente est celle du talus du remblai.

Le couloir a $0^m,20$ de largeur. Pour faciliter le glissement du béton, le fond est revêtu de zinc. Le béton y forme une couche de $0^m,06$ à $0^m,10$ d'épaisseur qui glisse lentement à raison de $0^m,05$ à $0^m,10$ par seconde. Arrivé à l'extrémité inférieure du couloir, il tombe dans une caisse où on le prend à mesure pour l'employer.

Souvent, dans le mouvement de descente du béton, de petites pierres se détachent de la masse, roulent, bondissent, et pourraient blesser les ouvriers qui travaillent au bas des couloirs. Pour parer à ce danger, on a suspendu dans l'intérieur du couloir, à peu près de $3^m,50$ en $3^m,50$, des planchettes-pendules qui ne touchent ni les bords ni le fond; ces planchettes reçoivent le choc des petites pierres volantes et amortissent leur vitesse.

Chape en bitume. — La chape en bitume appliquée sur le revêtement en béton a $0^m,02$ d'épaisseur. On avait reconnu après plusieurs essais qu'un mélange de :

Goudron minéral	$10^{lit},50$
Chaux du Theil en poudre.	14 ,00
Sable fin torréfié.	42 ,00

pouvait donner un bitume solide et étanche.

Nous avons adopté ces proportions pour la chape.

Le goudron était versé dans une chaudière; lorsqu'il commençait à bouillir, on y versait la chaux peu à peu

pour maintenir la température du goudron. Un ouvrier, muni d'un ringard, opérait le mélange. On ajoutait ensuite peu à peu le sable desséché. On continuait à brasser la matière; la pâte arrivait rapidement à la consistance voulue pour se débiter facilement en tranches à la truelle. On employait le bitume chaud, après avoir passé une couche de goudron chaud sur la surface que le bitume devait occuper. On pilonnait le bitume immédiatement après l'emploi. Si la pâte n'était pas trop sèche, le goudron regonflait sous le pilon et l'opération était jugée bonne. Dans le cas où la pâte trop desséchée par un coup de feu aurait pris l'aspect granuleux, l'opération était manquée. La pâte était remise dans la chaudière et brassée de nouveau avec addition d'un peu de goudron.

Les ouvriers se formaient vite à cette manœuvre et il était rare que le point de cuit fût dépassé.

C'est ainsi qu'on a pu obtenir un revêtement résistant, très économique et dont l'étanchéité a laissé peu à désirer dans les premiers temps. L'expérience de six ans a cependant démontré que le bitume en se desséchant n'est plus suffisamment étanche et l'on a été conduit à revêtir le bitume d'un enduit appliqué à chaud et composé de neuf parties de goudron et de huit parties de chaux en poudre. Cet enduit qui a été employé avec succès sur les revêtements bitumés du canal de la Nesle parait devoir donner de bons résultats.

Déversoir. — Le trop-plein du réservoir s'écoule par un déversoir de 40 mètres de longueur, creusé dans le granit à droite du barrage. Dans les plus grandes crues, en supposant le réservoir plein, il passera sur le déversoir une tranche d'eau d'environ $0^{m},65$ d'épaisseur, ce qui correspond à un débit de 25 mètres cubes par seconde.

Projet d'agrandissement du réservoir. — Nous avons

indiqué plus haut l'insuffisance de la retenue du réservoir actuel. Pour continuer l'œuvre commencée, nous avons proposé d'augmenter la capacité du réservoir et de la porter à 17 millions de mètres cubes, en exhaussant le barrage actuel de 19 mètres.

Le remblai supplémentaire devait se faire par les mêmes moyens qui ont assuré l'incompressibilité du remblai actuel et écarté toutes chances de destruction par suite de tassements. Un revêtement en béton avec chape en bitume, assis sur un drain général, devait, comme dans le barrage actuel, mettre le remblai complètement à l'abri des infiltrations venues du large.

A ces conditions techniques dont l'expérience a montré la complète efficacité, se joignaient les conditions d'une exécution relativement rapide et facile et d'une considérable économie.

La Commission de l'hydraulique agricole chargée d'examiner le projet recula devant l'exhaussement de 19 mètres proposé et repoussa le projet.

Dans notre pensée, la réserve de 6 millions de mètres cubes restant à créer après l'exhaussement du barrage d'Orédon pouvait être facilement réalisée à l'aide de petites retenues exercées sur les lacs supérieurs tributaires du lac d'Orédon. Ces retenues ne dépasseraient pas 6 mètres de hauteur et les barrages pourraient être construits assez solidement pour ne laisser aucune crainte de désastre. Le réservoir d'Orédon resterait donc à l'abri de l'invasion subite des eaux venant des réservoirs supérieurs.

Tout autre sera la situation, si, comme la Commission le prescrit, il faut demander aux lacs supérieurs une réserve de 16 millions au lieu de 6 millions de mètres cubes. Il faudra relever le niveau de certains lacs de 11 mètres et de 14 mètres et construire des barrages aussi importants que celui d'Orédon; mais malheureusement les moyens

qui ont assuré le remblai du barrage d'Orédon contre tout tassement sont à peu près impraticables aux lacs supérieurs, faute de matériaux convenables. Et, sans entrer dans plus de détails à ce sujet, on comprend aisément que les garanties de sécurité seront singulièrement diminuées.

Tarbes, le 21 décembre 1886.

N° 53

NOTE

SUR DES

EXPÉRIENCES DE CONGÉLATION DES TERRAINS

Par M. ALBY, Ingénieur des ponts et chaussées.

INTRODUCTION.

Au mois d'avril 1884, les *Annales* ont publié dans la chronique un extrait des *Annales des travaux publics* signalant l'existence d'un procédé de traversée des terrains aquifères par la méthode de congélation de M. Pœtsch, d'Aschersleben.

Depuis cette époque a paru dans les *Annales des mines*, juillet-août 1885, un article de M. Lebreton, ingénieur des mines, sur la même méthode qu'il avait étudiée à Kœnigswusterhausen. En outre, une mission composée de MM. Convrat-Desvergnes, ingénieur des ponts et chaussées, et Ichon, ingénieur des mines, a étudié de nouveau le procédé près de Finsterwald, en Prusse, au sujet d'une application possible à un souterrain de la ligne de Montauban à Brive. Cette mission a été suivie d'expériences que nous avons exécutées dans les ateliers de MM. Rouart frères, à Paris, à la fin de l'année 1885. La présente note, dont les matériaux ont été en grande partie empruntés aux travaux de MM. Lebreton, Convrat-Desver-

gnes et Ichon, a pour but d'exposer l'historique du début du procédé et de rendre compte des expériences.

HISTORIQUE.

I. Principe de la méthode.

Le principe de la méthode Pœtsch est d'une grande simplicité théorique. Il consiste à solidifier par la congélation les masses fluides à travers lesquelles on doit pratiquer des fouilles. Dans ce but, on y fait passer, à l'aide d'une tuyauterie convenablement disposée, un courant continu de liquide incongelable maintenu à une très basse température par une machine à glace.

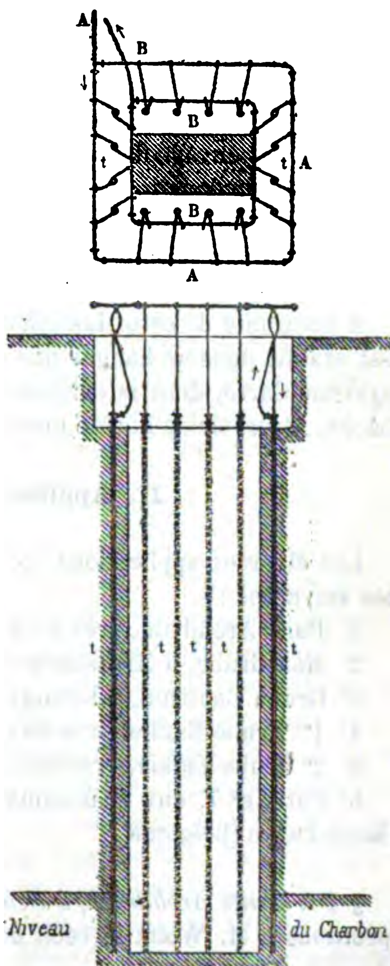


Fig. 1.

Les différentes applications qu'à reçues jusqu'à ce jour cette méthode sont toutes relatives à des puits de mine et la marche suivie s'écarte peu de celle que nous allons succinctement décrire.

Sur la périphérie de la fouille à creuser est enfoncée une première

série de tubes métalliques *t* d'environ 20 centimètres de diamètre que l'on ferme à la partie inférieure et que l'on coiffe d'une calotte en fonte à la partie supérieure. A l'intérieur de ces tubes sont introduits une seconde série de tubes d'un diamètre plus petit ouverts à leur partie inférieure. Ces tubes traversent les calottes citées plus haut et se raccordent tous avec un tuyau collecteur A. De même, les calottes des premiers tubes sont réunies par une tubulure à un autre collecteur B.

Le liquide incongelable, au sortir de la bâche où il se refroidit, est envoyé dans le collecteur A par une pompe; il se distribue dans la série des tubes intérieurs, remonte par les espaces annulaires de la première série de tubes, et retourne par le collecteur B dans la bâche d'où il est sorti.

A proximité de cette installation, à la surface du sol, est établie dans un hangar une machine à ammoniaque, système Carré, dont le congélateur est placé dans une bâche, réservoir du liquide incongelable.

II. Applications.

Les diverses applications de la méthode Pœtsch sont les suivantes :

1° Puits Archibald, près de Schneidlingew;
2° Max Grube, à Michalkowitz;
3° Grube Centrum, à Kœnigswusterhausen;
4° 1er Grube Emilie, près de Finsterwald (Prusse);
5° 2e Grube Emilie, près de Finsterwald;
6° Puits n° 7, aux charbonnages de Houssu, à Haine-Saint-Pierre (Belgique).

§ 1er. *Puits Archibald, à Schneidlingew.* — Nous empruntons à M. Weitz le récit des débuts de la méthode Pœstch.

« Avant de publier sa méthode, qui est brevetée dans toute l'Europe et aux États-Unis, M. Pœtsch procéda d'abord à des expériences en petit; il versa environ 4 mètres d'un mélange de sable et d'eau dans une caisse où était fixé un tuyautage communiquant à une machine à fabriquer la glace ; il fit circuler par ces tubes le courant réfrigérant, et observa, chaque jour, au moyen de thermomètres et à des heures différentes, l'abaissement de la température. Dans l'espace de huit jours, les 4 mètres cubes de terrain aquifère se trouvaient parfaitement congelés, et, après avoir enlevé les parois de la caisse, la masse resta debout comme un bloc de grès, avec une dureté et une consistance analogues.

« Dans cet essai, l'inventeur avait employé des tubes en cuivre et en fer, et a pu constater que, pour le refroidissement, le cuivre présentait une supériorité sur le fer, mais seulement pendant les premiers jours; après cinq jours, le froid devint aussi intense autour du tube en fer que celui régnant autour du tube en cuivre, et, à partir de là, le froid se produit à un même degré d'intensité par les tubes des divers métaux.

« L'inventeur, assuré dès lors du succès pratique de son invention, par les résultats obtenus de ce premier essai, en fit d'autres plus importants et en grand. C'est dans ce but que l'usine Douglas, à Aschersleben, mit obligeamment à sa disposition les moyens d'appliquer le procédé dans la concession de lignite « Archibald » de la concession Douglas, près de Schneidlingen. Dans cette concession se trouvait précisément un puits inachevé, de forme rectangulaire (3^m,45 sur 4^m,75), creusé dans des bancs résistants jusqu'à 34 mètres de profondeur et qui n'étaient séparés du terrain houiller que par une couche mouvante et aquifère de 5^m,50 d'épaisseur.

« On avait essayé d'approfondir en cherchant à se débarrasser de la masse liquide, mais, après avoir pénétré

dans la couche aquifère, on avait dû suspendre les travaux. Pour donner une issue à la grande veine d'eau, on avait pratiqué un sondage jusqu'à une galerie située en dessous.

« M. Pœtsch fit enfoncer 23 tubes de 200 millimètres de diamètre, dont 10 tout contre les parois du puits, et les fit pénétrer jusqu'à $0^m,50$ dans la couche de lignite située en dessous du terrain aquifère. Ces tubes étaient munis, à la partie inférieure, d'une lance de forme conique, dans laquelle on introduisit un tampon en bois pour la boucher. Ce tampon fut ensuite recouvert de plusieurs couches d'un mélange de ciment, de plâtre et d'argile, de 6 centimètres d'épaisseur chacune, ainsi que de goudron et d'une plaque de fer-blanc bien ajustée, destinés à compléter l'étanchéité du fond des tubes. On introduisit ensuite, au centre des tubes, des tuyaux de 30 millimètres de diamètre intérieur, ouverts à la partie inférieure. M. Pœtsch a depuis modifié son système d'obturation.


Fig. 2.

« Pour observer la marche de l'abaissement de la température des couches, on enfonça dans le puits à différents intervalles, près des tubes servant à la congélation, de petits tuyaux en fer au nombre de 20, ayant chacun $0^m,50$ de longueur, fermés en bas et contenant une solution de chlorure de calcium dans laquelle on plongea des thermomètres. On mesura ainsi, toutes les 24 heures, l'abaissement de la température.

« Il se produisait un grand abaissement de température au fond du puits; cet abaissement a atteint —6° pendant les derniers jours de travail; mais on ne constatait cette basse température que lorsqu'on la mesurait immédiatement après la descente; la température augmentait aussitôt, par suite de la présence de l'observateur, à cause de la chaleur dégagée par son corps. Pen-

dant le creusement, lorsqu'il se trouvait constamment plusieurs mineurs au fond du puits, le thermomètre marquait régulièrement de —0°,5 à —1°, ce qui ne fut nullement préjudiciable aux ouvriers, mais, au contraire, exerçait sur eux une fraîcheur salutaire.

« Pendant le creusement qui se fit entre les tubes, la congélation se propagea rapidement plus avant dans toutes les directions du puits. Le fond du puits se trouvait parfaitement étanche, et la masse congelée avait une dureté analogue à celle du grès. On attaqua la masse au moyen de marteaux à pointe, de pinces et de pioches sans faire de mines, et, quand on avait creusé environ 1 mètre, on garnissait cette partie par un revêtement en bois. Le 30 septembre 1883, on découvrit la couche de lignite. Cette couche était encore congelée à environ 1 mètre en dessous des tubes et était tellement adhérente au terrain aquifère, que dans le travail on arrivait rarement à fendre le bloc ainsi formé au contact de deux couches différentes ; les morceaux abattus se composaient à la fois de lignite et de sable congelé.

« Ce point nous paraît d'une grande importance, en ce qu'il démontre que, par l'emploi de la méthod Pœtsch, on obtient constamment, à travers n'importe quel terrain, un mur monolithe et solide, de telle sorte qu'on n'a nullement à s'occuper de la disposition de la couche, à savoir si elle est horizontale ou inclinée.

« Après le percement du puits, on pratiqua horizontalement et à environ $0^m,50$ au-dessus de la couche de lignite, des sondages pour mesurer l'étendue du terrain congelé, et on constata qu'autour de chaque tube, il y avait un cercle de glace d'environ $1^m,50$ de diamètre. D'autres observations ont démontré que l'étendue du terain congelé était plus grande vers le bas des tubes que vers le haut. Ce fait s'explique facilement ; le froid le plus intense est produit à la partie inférieure des tubes,

c'est-à-dire au point où le courant réfrigérant quitte la colonne descendante pour se répandre dans la colonne montante. Il se forme, au début, de petits cônes de terrain congelé, dont la base est en bas, et qui augmentent progressivement de volume. Ces cônes finissent par se rencontrer, s'entrecroisent et se soudent entre eux, de façon à former finalement un seul bloc dont l'épaisseur augmente avec la profondeur, ainsi qu'il vient d'être dit. »

§ 2. *Michalkowitz.* — A la suite du succès obtenu à Schneidlingen, M. Pœstch essaya l'application de sa méthode à la Max Grube, près de Michalkowitz, en Silésie. Mais on n'avait pas pris la précaution d'essayer les tubes préalablement, et il arriva que, sous les fortes pressions qu'ils avaient à subir, ils se déformèrent; ils cessèrent en même temps d'être étanches et M. Pœtsch fut obligé de faire de longues et coûteuses réparations qui absorbèrent le délai dans lequel son marché devait être exécuté.

D'ailleurs la compagnie fonçait, à peu de distance, un second puits où les difficultés étaient moindres. L'exécution de ce puits permit de faire baisser le niveau des eaux dans le premier, et la compagnie résolut de le poursuivre par les méthodes ordinaires. M. Pœtsch dut abandonner son travail.

§ 3. *Kœnigswursterhausen.* — La première application sur une grande échelle du procédé de M. Pœtsch s'est faite à la Grube Centrum, à Kœnigswusterhausen, près de Berlin (Pl. 35, *fig.* 1).

La couche de charbon était située à 30 mètres de profondeur et le niveau se trouvait à 4^{m},50 de la surface du sol. La largeur à donner au puits était de 4 mètres sur 2. On commença par creuser jusqu'à 4^{m},50 par les procédés ordinaires en donnant à l'excavation 6 mètres

sur 8. Ensuite, on enfonça, à l'aide de clapets à environ 1 mètre de distance d'axe en axe, 16 tubes de 0,191 de diamètre extérieur et de 0,175 de diamètre intérieur. Leur longueur moyenne était de 27^{m},70 et ils pénétraient d'au moins 30 centimètres dans la couche de charbon sous-jacente. Ces travaux préparatoires comprenant aussi l'obturation des tubes ont duré 40 jours, et se sont terminés au 4 avril 1884.

Le montage de la machine à glace ne fut prêt que le 12 avril et elle fonctionna jusqu'au 23 novembre. Au bout de cinq semaines de marche, au 18 mai, on épuisa l'eau qui se trouvait dans le puits et on essaya de descendre à l'abri du mur de glace, mais il n'était pas encore fermé et force fut de laisser le mur se renforcer jusqu'aux premiers jours de juin. A cette date, on put poursuivre le fonçage, on le poussa jusqu'à 20 mètres de profondeur en faisant suivre le cuvelage en bois. On fut arrêté par une réparation de la machine qui dura 12 jours. Le mur de glace perdit son étanchéité et on dut congeler depuis le 8 août jusqu'au commencement de septembre avant de reprendre le travail. Le 8 octobre, on atteignit le charbon à une profondeur de 32 mètres, mais on n'eut pas le soin de poser le dernier cadre du cuvelage.

On était descendu trop bas dans la couche de charbon, dit l'inventeur, l'eau apparut, venant par le charbon. On ne craignit pas d'installer un pulsomètre au fond du puits pour l'élever, tant était grande la confiance que l'on avait dans le mur de glace. Cet appareil ne marcha pas à souhait, des fuites de vapeur et d'eau chaude firent dégeler la partie inférieure du puits; par surcroît, la machine à glace subit un arrêt de quatre jours; bref, les eaux rentrèrent, et comme le dernier cadre du cuvelage n'était pas posé, le sable combla la partie inférieure du puits.

Depuis ce moment, le propriétaire de la mine, le docteur Siemens, l'illustre électricien, désirant essayer un

système d'assèchement général, a utilisé le puits comme puisard pour y installer de puissantes pompes.

§ 4. *Grube Émilie n° 1.* — Pendant que les travaux de la Grube Centrum étaient en cours d'exécution, M. Pœtsch appliquait également son procédé à la Grube Émilie, près Finsterwald, en Prusse.

Il s'agissait de percer un puits circulaire de $2^m,50$ environ de diamètre avec un revêtement de $0^m,315$ en briques. Le niveau aquifère se trouvait à peu de distance du sol et la couche de lignite à atteindre à 38 mètres de profondeur environ.

M. Pœtsch fonça, sur un cercle d'environ 4 mètres de diamètre à une distance de 1 mètre environ d'axe en axe et à une profondeur moyenne de $38^m,50$, 12 tubes de $0^m,191$ de diamètre extérieur et de $0^m,175$ à l'intérieur.

A cet effet, il essaya une nouvelle méthode qui consistait à préparer à l'avance un sondage tubé d'un diamètre plus grand que les tubes congélateurs et à descendre ceux-ci à l'intérieur tout fermés.

Il se servait de tubes de 2 millimètres d'épaisseur et dont les diamètres variaient de 315 à 260 et à 225 millimètres. Mais ces tubes minces ne permirent pas de forer les trous en droite ligne et, après avoir été obligé de reprendre à trois reprises le fonçage de certains d'entre eux en diminuant successivement le diamètre des tubes employés, on en revint à utiliser les tubes congélateurs eux-mêmes pour cette opération.

Le résultat de cet essai malheureux fut que, pour 461 mètres de fonçage utile, on en exécuta 811.

Le travail, commencé au 1er avril, ne fut terminé que le 25 juin 1884 au lieu qu'il aurait pu l'être au 18 mai.

La congélation commença dans les divers tubes successivement du 14 au 26 juin. Elle fut considérée comme terminée le 3 août et le fonçage du puits fut entamé. Voici

les incidents qui le marquèrent. Au bout des deux premiers mètres on dut s'arrêter, car l'eau pénétrait dans le puits ; cet arrêt fut de courte durée. A 5 mètres de profondeur, cet incident se renouvela ; mais, à partir de ce moment, on put descendre sans aucun arrêt. L'intérieur du puits était gelé et les sondages latéraux faits aux profondeurs de 16 mètres et de 26 mètres firent voir que la couche de glace avait une épaisseur de $0^m,75$ à l'extérieur des tubes.

En arrivant près du charbon qui se trouvait à $37^m,30$ de profondeur, un peu d'eau pénétra dans le puits. Il fut facile de l'épuiser avec des tonneaux. Pour éviter des rentrées considérables que l'on pouvait redouter parce que le centre du puits n'était plus congelé à ce niveau et que les tubes pénétraient peu profondément dans le lignite, on étancha le fond du puits avec de la maçonnerie et on continua le fonçage de la partie annulaire par les procédés ordinaires.

Le charbon fut atteint à la fin d'octobre 1884, au bout de quatre-vingt-sept jours de fonçage. On commença immédiatement à élever le cuvelage de briques en laissant un intervalle de $0^m,30$ entre la paroi gelée et la maçonnerie ; mais lorsqu'on eut atteint vers le 20 novembre le cinquième mètre à partir du fond, la machine dut subir un arrêt de quatre jours. Cet arrêt suffit pour provoquer le dégel de la partie inférieure du mur de glace, et les eaux se montrèrent entre la maçonnerie et la paroi : ces eaux étaient chargées de sable ; cet indice prouvait une corrosion évidente de la partie congelée. Au lieu de lutter contre leur invasion comme on l'avait fait à Kœnigswusterhausen, on les laissa remonter et l'on reprit la congélation. Quand la muraille eut assez d'épaisseur pour permettre d'épuiser les eaux qui avaient pénétré à l'intérieur du puits, les travaux furent repris et menés à bonne fin. Les tubes ont été très facilement retirés du terrain après

l'arrêt définitif de la machine, en faisant circuler du liquide chaud pour dégeler le terrain tout autour.

Dans cette dernière phase on ne prit même pas le soin d'isoler la maçonnerie de la paroi congelée. La machine à glace a fonctionné jusqu'à la fin de mars 1885. La maçonnerie a d'ailleurs très bien fait prise et résisté après le dégel de la masse du terrain.

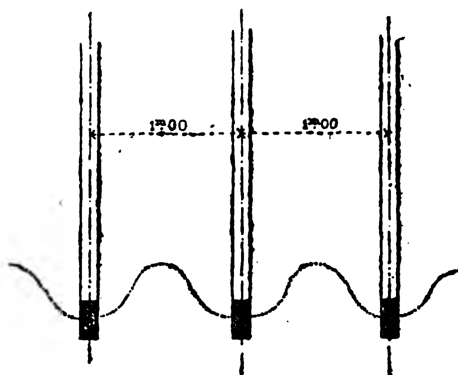


Fig. 3.

Les observations faites dans la partie inférieure du puits ont montré que la congélation ne dépasse pas le pied des tubes et qu'elle est sensiblement plus faible dans l'intervalle de deux tubes : c'est par l'intervalle entre deux tubes que les eaux sont rentrées. M. Wermingoff a ajouté à ces observations qu'en descendant on a trouvé le terrain mou au centre du puits avant d'atteindre le fond. Selon lui, la forme affectée par la zone congelée serait, au bas, analogue à celle du croquis ci-dessus (*fig.* 3).

§ 5. *Grube Émilie n° 2.* — La réussite du premier puits de Finsterwald détermina le directeur de la mine à traiter pour le second avec M. Pœtsch. Ce sont les travaux de ce puits que la mission de MM. Couvrat et Ichon visita au mois de juin 1885. Depuis cette visite, M. Werminghoff, directeur de la mine, nous a gracieusement mis au courant de la suite des travaux par diverses lettres.

La section du puits à creuser entre le nu des parois du

terrain était de 2^m,50 sur 4 ; 16 tubes furent déposés sur un périmètre rectangulaire à 0^m,25 de distance des parois. Le niveau du charbon à atteindre se trouvait à environ 30 mètres de la surface. Les tubes y furent enfoncés de 0^m,80 à 1^m,75. Le puits devait recevoir un cuvelage en maçonnerie de forme ellipsoïdale d'une épaisseur de 0^m,315.

Le diamètre des tubes était, comme au premier puits, de 0^m,175 à l'intérieur et de 0^m,191 à l'extérieur. Leur fonçage s'est opéré sans accident ; on n'a pas employé de tubages auxiliaires. La profondeur de sable aquifère à traverser était de 36 mètres : on a fait pénétrer les tubes aussi profondément que possible dans le charbon. La pénétration variait de 0^m,80 à 1^m,75.

On donna aux tubes une inclinaison de 0^m,30 vers l'extérieur, nous a-t-on dit, pour augmenter l'épaisseur de la couche de glace au pied et aussi pour ne pas être exposé à rencontrer les tubes dans les travaux ; cette disposition avait été également employée au premier puits.

Le fonçage des 16 tubes a été opéré à l'aide de trois équipages de sonde et il a duré quarante-cinq jours.

La congélation a duré huit semaines. Au bout de ce temps, on a commencé le fonçage du puits (juin 1885) qui s'est poursuivi sans incident pendant une quinzaine de mètres ; le mur de glace par lui-même résistait à la pression et quelques boisages avaient été disposés par mesure de simple précaution. A ce niveau, un renard se produisit, et les eaux remontèrent dans le puits (fin juin). Cet accident a été attribué au mauvais fonctionnement d'un tube dans lequel des scories s'étaient introduites. Le 8 juillet le mur de glace s'était refermé ; il fut possible d'épuiser et de reprendre les travaux. L'intérieur du puits jusqu'au centre était gelé. Le directeur de la mine fit faire, à 15 mètres et à 17 mètres de profondeur, deux sondages, et il fut assuré qu'à 0^m,60 et à 0^m,65 de la pa-

roi du puits le terrain était solidifié. On descendit sans accident jusqu'au 30e mètre en s'assurant de l'épaisseur de la paroi par des sondages faits de mètre en mètre.

« Dans le 30e mètre, un trou de sondage donnait le résultat inattendu que le mur de glace n'avait que 0m,33 d'épaisseur, ce qui n'était pas suffisant. Ce sondage se trouvait tout près d'un autre où le mur de glace ne fut pas encore percé à 0m,77. Il fut impossible de continuer les travaux; mais pour savoir si la partie faible était plus ou moins grande, un sondage fut fait de l'autre côté du puits. Ce sondage ne parvint qu'à 27 centimètres. A ce point, l'eau entra dans le puits et les mineurs furent obligés de se sauver par le haut le plus vite possible. Le directeur donnait tout de suite l'ordre de remplir le puits d'eau pour diminuer la pression, car l'eau mélangée de sable entrait en grande masse. »

On était au 16 août. On attribua l'accident aux suintements de liquide incongelable et on pensa que la rentrée d'eau avait dû nettoyer le terrain au pied des tubes. On remplaça les tuyaux qui parurent mal fermés et on continua la congélation pendant trois semaines.

Au bout de ce temps on put épuiser et parvenir de nouveau au 30e mètre après un arrêt de quatre semaines en tout (octobre 1885). Le mur de glace avait acquis une épaisseur suffisante et on put creuser jusqu'à 0m,50 au-dessous du niveau du charbon. L'eau parut à ce niveau, passant par le charbon, mais arrivant avec une force nulle et sans mettre le puits en danger. Pendant les quatre semaines suivantes, on compléta le cuvelage du puits sous la protection du mur de glace maintenu à basse température par la machine à froid.

M. Werminghoff ajoute que la formation du mur affectait la forme du croquis déjà produit pour le puits précédent et que jusqu'à 1 mètre du bout des tubes la couche de glace s'était montrée épaisse.

§ 6. *Houssu.* — La dernière application du procédé Pœtsch se poursuit au puits n° 8 des charbonnages de Houssu à Haine-Saint-Pierre (Belgique). Nous devons à l'obligeance du directeur les renseignements suivants qu'il nous a fournis après une visite sommaire.

Le diamètre du puits à terre nue est de 4^m,70, le diamètre utile devant être de 4 mètres.

Les sables se montrent à 62 mètres de profondeur et l'argile, terrain solide, a son point le plus bas à 73^m,51. Le charbon se trouve à un niveau plus bas, à plusieurs centaines de mètres.

Les tubes, au nombre de 18, sont placés sur un cercle de 2^m,50 de rayon. Ils ont comme diamètres 0^m,191, 0^m,175. Bien que la couche à traverser ne soit que de 11 mètres de puissance, on a donné aux tubes une longueur de 21 mètres et on a placé, à 54 mètres de profondeur, les tubes collecteurs. Les tubes congélateurs descendent ainsi jusqu'à 75 mètres de profondeur. Ils ont été foncés par rodage à bras d'homme.

Le niveau des eaux était maintenu par les pompes à 54^m,50. L'opération a été pénible, car les sables mis en mouvement par les tubes envahissaient le puisard des pompes.

Le froid est produit par deux machines de 450 kilogrammes de glace à l'heure. L'une est en service depuis le 5 décembre 1885 et l'autre seulement depuis le 18 juillet 1886.

Avant la congélation, le cube des eaux à épuiser était de 27 mètres dont 10 provenaient des sables. Ce cube a beaucoup diminué depuis le commencement de la congélation. Mais on n'a pas encore commencé le fonçage du puits.

III. Examen de la méthode.

Les applications de la méthode Pœtsch qui avait si bien réussi à Schudlingen ont été marquées par un grand nombre de mécomptes.

C'est qu'elle contient un grand nombre de points délicats sur lesquels l'inventeur ne s'est peut-être pas toujours formé une idée bien juste. Il a d'ailleurs introduit lui-même quelques modifications que la pratique de sa méthode lui a dictées.

Nous allons passer en revue les divers éléments de la méthode en indiquant les perfectionnements déjà introduits et les points qui paraissent délicats ou obscurs et qui ont décidé M. Couvrat-Desvergnes à demander que des expériences fussent faites pour les élucider.

§ 1er. *Machine génératrice du froid.* — M. Pœtsch a employé, pour les divers trous qu'il a exécutés, deux machines à glace de 500 kilogrammes à l'heure, soit de 50.000 calories. Ces machines lui ont été fournies par M. Oscar Kropff, de Nordhausen. Ces machines, dont les types ont été créés par l'industrie française, ne diffèrent pas essentiellement de celles que construit à Paris la maison Rouart, concessionnaire du brevet Carré, et dont nous allons donner une rapide description.

Le principe des machines à ammoniaque est bien connu.

On chauffe une solution d'ammoniaque : ce gaz se dégage et, sous sa propre pression, se liquéfie.

On fait vaporiser le gaz liquéfié qui engendre ainsi le froid. On reconstitue avec le gaz la dissolution ammoniacale et on l'emploie de nouveau.

Les organes de la machine sont :

A Chaudière à ammoniaque à feu nu, ou mieux à vapeur, où le gaz ammoniac se dégage de sa dissolution. Cet organe comprend encore une sorte de condenseur à chicanes où le gaz abandonne la plus grande partie de la vapeur d'eau qu'il entraîne mécaniquement.

B Condenseur où le gaz se refroidit et se condense.

C Réservoir où il se réunit à l'état liquide. Le réservoir est muni d'un robinet qui permet de régler la sortie de l'ammoniaque liquéfiée.

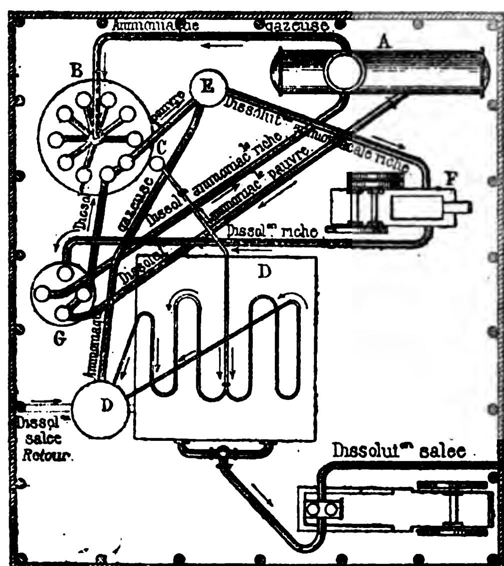


Fig. 4.

D Congélateur où l'ammoniaque liquide se vaporise. Ce congélateur est un serpentin placé dans la bâche qui sert de réservoir pour le liquide incongelable.

E Vase d'absorption où le gaz se trouve en contact avec la dissolution ammoniacale faible et froide.

F Pompe qui prend la dissolution enrichie pour la renvoyer dans la chaudière.

G Échangeur de température ou réchauffeur où la dissolution riche et froide prend une partie de la chaleur que perd la dissolution faible et chaude qui sort par la partie inférieure de la chaudière sous la pression du gaz. La dissolution faible traverse ensuite le condenseur pour achever de se refroidir avant d'arriver au vase d'absorption. Un second robinet règle la sortie du liquide pauvre de la chaudière.

La marche de la machine repose sur le réglage des deux robinets que nous avons énumérés.

Le choix de la machine à ammoniaque est très judi-

cieux. Ces machines permettent, en effet, d'obtenir, dans de bonnes conditions de rendement, de très basses températures. On peut abaisser la température du liquide incongelable jusqu'à 25° en dessous de zéro. Il est difficile d'atteindre des températures inférieures en marche courante à cause des déperditions qui deviennent considérables.

La vaporisation de l'ammoniaque peut néanmoins produire des températures inférieures à cette limite : dans les petits appareils domestiques si connus où la déperdition devient pour ainsi dire nulle, on dépasse 30°, on peut même y congeler le mercure.

La machine se prête à des installations dans les conditions les plus diverses. On peut notamment, pour diminuer les pertes, rapprocher le réservoir *c* du congélateur D.

D'ailleurs, la force motrice nécessaire est très faible.

Enfin, dans les machines bien construites, la perte d'ammoniaque est nulle et la production du froid atteint 2.000 calories négatives par kilogramme de charbon brûlé.

La seule difficulté de l'installation est la nécessité d'avoir une quantité d'eau courante considérable pour le condenseur. Cette difficulté, dans certains cas, peut être considérable. Elle constituait une objection très sérieuse à l'emploi du procédé de congélation au tunnel de la ligne de Montauban à Brive.

Pour bien fonctionner, le condenseur consomme un cube d'eau de 15 à 25 litres par kilogramme de glace. Pour une seule machine de 1.000 kilogrammes de glace à l'heure, il faut disposer d'un courant d'eau de 15 à 25 mètres cubes à l'heure. Dans les calcaires fissurés du midi de la France, un pareil courant est chose rare.

§ 2. *Liquide en circulation et tuyauterie.* — La so-

lution saline dont M. Pœtsch s'est servi pour distribuer le froid dans ses tubes a été soit du chlorure de magnésium, soit du chlorure de calcium.

L'emploi de ces solutions n'est pas sans danger : en se répandant dans le terrain, elles peuvent en empêcher la congélation; M. Pœtsch a attribué à des fuites de liquide la plupart de ses mécomptes.

C'est afin d'éviter des pertes par le froid que M. Pœtsch a adopté le mode de fermeture suivant, auquel il est arrivé après des tâtonnements. Dans l'histoire des premiers essais de M. Pœtsch, M. Weitz a indiqué le mode de fermeture employé à Schneidlingen, système auquel il a renoncé après l'accident de Michalkowitz. Actuellement, on fait glisser au fond du tube qui ne porte aucun épanlement un cylindre de carton fendu suivant une génératrice d'une longueur d'au moins 0,25 et de 0,010 environ d'épaisseur; à l'intérieur de ce cylindre, on place un bouchon en plomb. Au-dessus de ce bouchon, on place successivement des couches de ciment et de coaltar d'environ 6 centimètres d'épaisseur et par-dessous une rondelle de tôle bien ajustée. M. Pœtsch essaie les tubes une fois montés sous une pression de 10 atmosphères afin de s'assurer qu'il n'y pas de fuites.

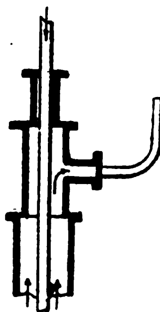


Fig. 5.



Fig. 6.

Il n'a pourtant pas réussi à les éviter au second puits de Finsterwald. L'emploi d'un tubage préalable avait été fait au premier puits pour permettre de placer les tubes fermés à la surface du sol : c'était une solution. A Houssu, les tubes ont été enfoncés à 2 mètres dans le terrain sous-jacent afin d'enlever aux fuites leur effet dange-

reux : c'est une seconde solution qui a besoin d'une sanction de l'expérience.

§ 3. *Formation de la glace autour des tubes.* — M. Weitz, en expliquant les débuts de la méthode Pœtsch, a nettement indiqué qu'il se formait des cônes de glace évasés à la base, lesquels se soudaient à la partie inférieure, de telle sorte que, lorsque le puits est fermé dans la partie supérieure, on peut être assuré de l'étanchéité à la partie inférieure.

Les accidents survenus à Kœnigswusterhausen et au premier puits de Finsterwald étaient de nature à donner des inquiétudes sur l'exactitude de cette manière de voir.

Le raisonnement de M. Pœtsch est fondé sur ce fait que la température du liquide dans les espaces annulaires est plus basse au débouché des tubes intérieurs qu'à la partie supérieure. Cette assertion paraît au moins douteuse lorsqu'on tient compte de l'action des tubes intérieurs qui joue vis-à-vis du liquide des espaces annulaires le rôle d'un réfrigérant (*). En outre, il semble naturel de

(*) Coupons un tube Pœtsch par des plans perpendiculaires à l'axe et considérons le liquide situé entre ces deux plans dans l'espace annulaire. Le liquide reçoit continuellement par les parois AA' et DD' de la chaleur et il en cède constamment à la paroi BB'CC', qui est maintenue plus froide par le liquide arrivant du congélateur.

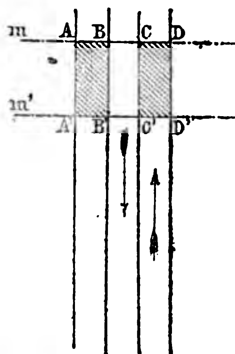


Fig. 7.

Si la quantité de chaleur qu'il reçoit de la première paroi est plus grande que celle qu'il cède à la seconde, le liquide s'échauffe; si elle est inférieure, au contraire, il se refroidit.

Portons sur une ligne verticale MN la longueur du tube Pœtsch et horizontalement en ordonnées les quantités de chaleur passant par la paroi BC, B'C', rapportées à chaque point à l'unité de longueur. Au point N, pied du tube, l'ordonnée est nulle et elle va crois-

penser, à première vue, que la partie inférieure des tubes recevait non seulement l'action calorifique des masses de terrain au même niveau, mais de toute la masse sous-jacente qui est un réservoir indéfini de calories, se recouvre d'une couche de glace bien moindre que la partie médiane de ces tubes.

Ces considérations sont celles qui ont motivé l'exécution des expériences.

---

sant depuis N jusqu'à M, car cette quantité de chaleur croît nécessairement avec la différence des températures du liquide dans le tube central et dans l'espace annulaire, différence qui croît constamment de N à M; ce dernier point est évident, car si l'on coupe le tube à niveau *qcq*, cette différence de température représente la quantité de chaleur enlevée au sol par la portion du tube située en dessous.

La courbe dont nous avons défini les ordonnées sera de la forme NP et l'aire MNP représente la quantité de chaleur qui passe de l'espace annulaire au tube intérieur.

Portons maintenant sur les ordonnées les quantités de chaleur passant par la paroi AA' DD'; cette courbe ne coupe jamais l'axe MN, car il passe toujours de la chaleur du terrain au tube; cette courbe aura la forme QR, et la surface MNQR représente la quantité totale de chaleur perdue par le terrain.

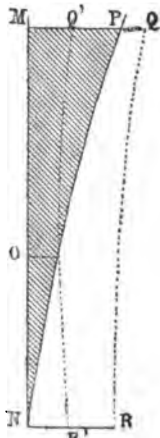


Fig. 8.

Au fur et à mesure que le tube s'allonge, l'ordonnée MP croît.

Au fur et à mesure que le travail de congélation avance, la courbe QR se rapproche de l'axe MN et il peut très bien arriver qu'elles se coupent.

Si, pendant toute la durée de la congélation, QR ne coupe pas NP, cela veut dire que, du haut en bas du tube, le liquide de l'espace annulaire se réchauffe et c'est bien en M qu'il est le plus froid. Mais si les courbes se coupent, de N en O, le liquide se réchauffe; mais de O en M il se refroidit et il peut se faire que sa température soit plus basse en M qu'en N. Il est aussi démontré qu'on ne peut rien affirmer *à priori* sur la distribution des températures dans le liquide des espaces annulaires, sans connaître la loi des échanges de température qui ont lieu dans le terrain ou dans le liquide en mouvement.

§ 4. *Travail dans les masses congelées.* — Un point qui a préoccupé beaucoup ceux qui se sont intéressés à la méthode de congélation a été la possibilité de travailler au milieu de la glace et celle d'y construire des maçonneries. L'expérience a fait voir que les ouvriers ne sont nullement incommodés dans les puits gelés : la température de l'air s'y maintient à deux degrés environ au-dessous de zéro pendant le travail : il suffit que les ouvriers aient la précaution de se munir de sabots pour ne pas être exposés à avoir les pieds dans une humidité froide.

Quant aux maçonneries, nous avons constaté la bonne prise qu'avaient faite celles de la Grube Emilie n° 1. Il ne semble pas que quelques degrés au-dessous de zéro soient un obstacle à leur bonne exécution.

EXPÉRIENCES.

Les expériences, dont la discussion et les résultats sont ci-après exposés, ont été exécutées dans les ateliers de MM. Rouart frères, au mois d'octobre 1885.

Elles ont porté sur deux sujets distincts : le premier est la formation de la couche de glace autour des tubes; le second, la résistance des terrains congelés. Bien que les expériences aient été menées simultanément, il est indispensable de séparer les deux études.

PREMIÈRE PARTIE.

FORMATION DE LA COUCHE DE GLACE AUTOUR DES TUBES.

I. Généralités.

Description de l'appareil d'expérience. — L'appareil se compose d'un réservoir cylindrique en tôle de 3 millimètres ayant un diamètre de $1^m,40$ et une hauteur d'environ 3 mètres. Dans l'axe est placé un tube de $3^m,25$ de longueur, de $0^m,17$ de diamètre extérieur, et de $0^m,008$ d'épaisseur, en tôle soudée, analogue à ceux dont M. Pœtsch fait usage. Ce tube, fermé à la partie inférieure par une calotte hémisphérique soudée à la forge, est l'élément congélateur. Il repose par sa partie inférieure sur un trépied, et il est fixé à sa partie supérieure par un collier métallique à un fer à **T** rivé sur les parois du réservoir (Pl. 35, *fig.* 2).

Le réservoir, placé verticalement dans une fosse de $0^m,50$ de profondeur, est entouré, dans toute la partie au-dessus du niveau du sol, d'une épaisse couverture de paille qui l'isole de l'atmosphère ambiante.

Sur sa paroi, deux séries de dix ouvertures *a* disposées en hélice permettent d'introduire une sonde en fer pour déterminer le profil de la masse congelée ; la disposition en hélice sert à contrôler ce qui se passe dans les différents méridiens.

Outre ces ouvertures, douze autres, placées suivant une génératrice, servent à appuyer les extrémités de douze tubes de laiton de 12 millimètres de diamètre, fermés en bout. Les douze autres extrémités de ces tubes sont logées dans douze ouvertures percées dans un fer plat parallèle au tube central. Les tubes sont légèrement inclinés et ils peuvent demeurer remplis d'un liquide incon-

gelable. Ils permettent l'introduction de thermomètres dans la masse.

Le tube central porte à sa partie supérieure une cuvette en fer-blanc C dans laquelle le liquide incongelable se déverse librement et d'où il s'écoule par un tuyau dans le congélateur de la machine à glace.

Sur la paroi du tube central sont boulonnés trois petits montants verticaux qui soutiennent une pièce creuse en fer forgé à laquelle est suspendu le tube intérieur d'amenée du liquide. Sur cette pièce vient également s'assembler le tuyau de refoulement de la pompe de circulation. Enfin, au centre de la pièce creuse est engagé un tube de laiton analogue à ceux déjà cités, et dont le but est de permettre la mesure de la température du liquide entrant.

La machine à glace est actionnée pendant le jour par un des arbres de l'atelier, pendant la nuit par un moteur à gaz. La pompe de circulation est mise en mouvement par un moteur à gaz spécial.

Manière d'opérer. — La tige de fer qui servait aux sondages était entaillée à son extrémité de manière à ramener quelque peu du sable qu'elle traversait; un curseur glissant à frottement permettait de faire les mesures de longueur sans difficulté.

Pour mesurer les températures on plongeait dans les tubes horizontaux des thermomètres à minima assemblés à une tige de cuivre mince. L'emploi des thermomètres à minima était obligatoire, car en les retirant du fond des tubes on observait un réchauffement de plusieurs degrés dû au passage à travers les couches plus chaudes du liquide.

Les indications fournies par le mode d'opérer adopté ne sont pas rigoureusement exactes, car les températures observées ne sont que le résultat d'échanges complexes

entre le terrain, le tube de laiton, le liquide, la tige thermométrique. Nous avons admis que la température lue était la température au milieu du réservoir thermométrique.

Les lectures faites dans un même tube sont très comparables, mais, en passant d'un tube à un autre, il y a une incertitude. La plus grande réserve est nécessaire dans la comparaison des résultats obtenus dans des tubes différents.

Dans la description de l'appareil, le procédé pour mesurer les températures du liquide à l'entrée du tube intérieur a été indiqué; la température du liquide sortant s'observait directement, le déversement ayant lieu à l'air libre.

Observations. — Nous signalons la circonstance suivante qui est très intéressante et qui n'avait pas été prévue.

Au début des expériences, le terrain était recouvert d'une couche d'eau de 3 ou 4 centimètres; par les bouchons en bois, qui fermaient les orifices de sondage, l'eau suintait. La couche d'eau a peu à peu disparu, au fur et à mesure de la formation de la glace, ainsi que les suintements.

Le terrain paraissait s'être asséché, et des crevasses se sont produites dans la partie non congelée de la masse de sable.

Pendant le réchauffement, les suintements ont recommencé, et, au bout de quelques jours, la couche d'eau s'est reformée à la partie supérieure. Ce phénomène semble indiquer que la proportion d'eau absorbée par la masse de sable augmente par le fait de la congélation; d'ailleurs, on conçoit facilement que le changement moléculaire produit par la solidification de l'eau modifie la distance des grains de sable.

En supposant, par exemple, que cette distance augmente plus que dans la proportion de 1/14, il se produit nécessairement un appel d'eau vers la partie qui se congèle. Rien n'assure, néanmoins, qu'en se plaçant dans un milieu indéfini, cet appel soit assez énergique pour assécher notablement la masse.

La température du liquide en circulation était, au début des observations, de 14°,6 à l'entrée; à la fin elle était de 17°. Elle a augmenté progressivement pendant toute la durée des expériences.

II. Discussion des expériences.

§ 1. *Distribution des températures dans un plan horizontal. Formule théorique.* — Dans l'article paru dans les *Annales des mines*, M. Lebreton indique l'équation de la courbe des températures dans le cas où l'équilibre est réalisé. En prenant comme abscisses les longueurs comptées à partir du centre sur un rayon, cette courbe a une équation de forme logarithmique que nous allons rapidement établir.

Appelons K le coefficient de conductibilité du terrain supposé invariable avec la température, c'est-à-dire le nombre de calories-kilogrammes qui traversent dans l'unité de temps (seconde) l'unité de surface (mètre carré) sur une épaisseur égale à l'unité (mètre) pour une différence de température égale à l'unité (degré), et θ la température de la masse à la distance r de l'axe. La quantité de chaleur qui traverse l'anneau cylindrique d'épaisseur dr et d'une hauteur de 1 mètre a, pour expression, d'après les lois de Fourier :

$$K 2\pi r \frac{d\theta}{dr} dr \frac{1}{dr} \ (^*),$$

(*) La quantité de chaleur est proportionnelle à la surface (facteur $2\pi r$, la hauteur étant l'unité), inversement proportionnelle

ou plus simplement :

$$(1) \qquad 2\pi K r \frac{d\theta}{dr}.$$

Cette expression suppose que la chaleur chemine horizontalement et qu'il n'y a aucun échange dans le sens vertical.

Si nous supposons, en outre, qu'il y ait un régime d'équilibre établi entre les températures, la quantité de chaleur qui traverse les anneaux successifs d'épaisseur *dr* est constante.

Soit *c* la lettre qui la désigne ; en l'égalant à l'expression trouvée ci-dessus, on obtient la relation :

$$(2) \qquad \frac{c}{2\pi K} = r \frac{d\theta}{dr},$$

qui n'est autre chose que l'équation différentielle de la courbe des températures et qu'il est facile d'intégrer :

$$\delta\theta = \frac{c}{2\pi K} \frac{dr}{r}.$$

$$(3) \qquad \theta = \frac{c}{2\pi K} \mathcal{L} r + \gamma.$$

Les constantes c et γ sont déterminées si l'on connaît les températures θ_1 et θ_2 en deux points du rayon aux distances r_1 et r_2 du centre.

$$(4) \qquad c = 2\pi K \frac{\theta_1 - \theta_2}{\mathcal{L} r_1 - \mathcal{L} r_2},$$

$$(5) \qquad \gamma = \frac{\theta_2 \mathcal{L} r_1 - \theta_1 \mathcal{L} r_2}{\mathcal{L} r_1 - \mathcal{L} r_2},$$

à l'épaisseur $\left(\text{facteur} \frac{1}{dr}\right)$, proportionnelle à la différence de température $\left(\text{facteur} \frac{d\theta}{dr} dr\right)$, enfin au coefficient de conductibilité (facteur K).

et l'équation de la courbe devient :

$$(6) \qquad \theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2}\mathcal{L}r + \frac{\theta_2\mathcal{L}r_1 - \theta_1\mathcal{L}r_2}{\mathcal{L}r_1 - \mathcal{L}r_2}.$$

Cette équation ne contient plus le coefficient de conductibilité K.

Discussion. — La distribution des températures pendant l'expérience varie d'une manière continue, mais la couche de glace croît lentement, et il est légitime de penser que la distribution est très voisine de celle qui correspond à l'hypothèse de l'équilibre (*).

Nous avons cherché à nous rendre compte du degré d'exactitude de cette supposition.

Nous avons mesuré les températures chaque jour dans les tubes situés à $0^m,50$, à $1^m,25$ et 2 mètres au-dessous de la surface du terrain, et tracé les courbes des températures obtenues (*fig.* 3 et 4).

Ces courbes ne représentent qu'approximativement la distribution réelle pour diverses raisons.

1° Parce que la température n'est pas la même en tous les points des réservoirs thermométriques qui avaient des longueurs variant de $0^m,035$ à $0^m,025$.

2° Parce que les tubes de laiton dont les extrémités d'un côté étaient à l'air libre sur environ $0^m,04$, ont introduit une perturbation (cette perturbation, variable avec les tubes selon qu'ils étaient plus ou moins remplis d'eau, est surtout sensible près des bords du réservoir).

(*) Tout ce qui suit ne s'applique qu'à la partie solidifiée à la surface de laquelle la température est 0°, car au dehors il est très difficile de faire une hypothèse plausible. D'ailleurs les expériences n'ont pas eu lieu dans des conditions permettant de tirer une conclusion applicable au cas où, au lieu d'avoir une masse limitée de terrain entourée d'une couche isolante, on aurait un milieu indéfini.

3° Parce que, à chaque thermomètre correspondait une erreur particulière, tenant probablement à sa forme, erreur que nous avons constatée en plaçant deux thermomètres différents au même point d'un tube et en vérifiant que les températures marquées étaient différentes après la correction du déplacement du zéro. Cette erreur, maxima au fond du tube, s'atténuait très vite.

De toutes ces causes d'erreur, aucune n'est de nature à faire marquer à l'un quelconque des thermomètres une température inférieure à celle du terrain. Aussi sommes-nous portés à attacher la plus grande confiance au thermomètre qui a marqué les températures les plus basses : c'est avec ce thermomètre que nous avons fait les mesures à 1,25 au-dessous de la surface, à un niveau où la forme du solide congelé était à peu près cylindrique.

Résultats. — Pour le tube situé à $1^{m},25$ de la surface dans une partie presque cylindrique du solide congelé, il y a accord sensible entre les températures mesurées et celles que donne le calcul; cet accord est remarquable pour le dernier jour, où la couche de glace a eu son épaisseur maximum (*).

Le calcul donne sur la paroi même du tube congélateur, des températures voisines de celles du liquide en circulation.

Pour les tubes situés à 0,50 et à 2 mètres au-dessous de la surface, nous savons *à priori* que l'hypothèse de la nullité de la transmission de chaleur dans le sens vertical est fausse et que par suite les calculs qui ont été faits ne sont pas applicables.

En effet, pour le tube situé à 2 mètres au-dessous de la surface, il est certain qu'il y a échange de chaleur

---

(*) Voir les observations qui suivent les tableaux I, p. 381.

entre le sol situé au-dessous qui peut être considéré comme une source de chaleur, et la partie inférieure du bloc gelé; la forme même du solide le prouve.

Pour le tube situé à 0,50, il subit certainement de la couche d'air qui est au-dessus du terrain un effet analogue; de plus, il n'est pas douteux que le tube central, en contact avec l'atmosphère, produise une perturbation vers le centre de la masse, analogue à celle que nous avons signalée pour les petits tubes de laiton.

Nous avons, malgré cette conviction, calculé les courbes de distribution de température et les valeurs de la quantité c. Les résultats de ces calculs sont des indications sur lesquelles nous n'insisterons pas; nous nous contentons de renvoyer aux tableaux annexes.

Conséquences. — La conséquence à tirer de ces résultats est la possibilité de déterminer l'épaisseur de la couche de glace en connaissant les températures en deux points.

On peut aller plus loin et déterminer approximativement le coefficient de conductibilité de la matière;

Soient c' et c'' les valeurs de la quantité c, à 24 heures de distance on peut admettre que la valeur moyenne est $\frac{c'+c''}{2}$ et $\frac{c'+c''}{2}\times 24\times 3600$ représente la quantité de chaleur qui a traversé la masse congelée pendant une journée.

Or c a une expression de la forme :

$$2\pi K\alpha,$$

et nous connaissons les deux valeurs de α, α' et α'' à 24 heures de distance par la relation (4);

$$2\pi K \frac{\alpha'+\alpha''}{2}\times 24\times 3.600$$

est donc l'expression de la quantité de chaleur.

D'autre part cette quantité de chaleur comprend :

1° La chaleur nécessaire pour solidifier un anneau de glace dont l'épaisseur est connue par les mesures journalières q;

2° La chaleur nécessaire pour modifier la distribution des températures de la masse congelée q';

3° La chaleur nécessaire pour refroidir la partie non congelée q'';

4° La chaleur perdue par la surface du réservoir q'''.

Les expériences permettent de calculer q, q', q''; q''' n'a pas été observé en raison de l'épaisseur de la couche de paille; nous le supposerons nul et nous aurons, pour déterminer K, la relation :

$$2\pi K \frac{\alpha' + \alpha''}{2} = \frac{q + q' + q''}{24 \times 3.600}.$$

D'ailleurs il existe une incertitude sur la valeur de q, car la proportion d'eau et de sable après la congélation n'est pas la même qu'avant et elle n'a pas été déterminée.

La valeur du coefficient K résultant des expériences est 0,00024 avec les unités adoptées.

Jusqu'à présent nous n'avons parlé que des températures à l'intérieur de la masse congelée. Dans la partie non solidifiée, l'intérêt n'est que secondaire et nous renvoyons simplement à la figure 4, planche II.

§ 2. *Distribution des températures dans un plan vertical méridien.* — Deux séries de mesures ont été faites au fond des tubes et, par les orifices latéraux, près de la paroi du réservoir, dans la masse même du terrain.

Les mesures prises près de la paroi du réservoir ont été faites avec le même thermomètre. Elles ont constamment donné des températures décroissant depuis le haut jusqu'à une certaine distance de la surface supérieure et croissant ensuite de telle sorte que la température minimum était à environ 0,75 de cette surface.

Ces résultats indiquent qu'il y avait un réchauffement par la partie inférieure et par la partie supérieure, le premier étant d'ailleurs bien plus énergique que l'autre.

Les mesures prises au fond des tubes ont été également faites avec un thermomètre unique : les chiffres qu'elles fournissent ont toutefois besoin d'être interprétés, car les tubes n'étaient pas tous à égale distance de la paroi du tube congélateur.

Néanmoins en comparant les indications obtenues dans les tubes situés à 1,75 et à 0,50 au-dessous de la surface, tubes placés à la même distance de la paroi du tube central, on trouve que le tube placé à 0,50 a donné des températures constamment plus élevées et que la différence a oscillé dans les environs de deux degrés dans les derniers jours.

En analysant de près les chiffres trouvés et en tenant compte des différences de distance des fonds des tubes à la paroi du tube central, on trouve que la surélévation de température s'étend à peu près jusqu'à 1 mètre au-dessous de la surface. Au delà, on peut considérer que la température est sensiblement constante sur la paroi du tube central.

On peut attribuer cet effet à deux causes différentes : la première est l'influence du tube métallique et du support en fer plat qui est soumis sur une certaine hauteur au réchauffement de l'atmosphère ambiante; la seconde est l'influence de la régularité de la marche des filets liquides. La régularité de cette marche qui est certainement plus grande dans le haut du tube que dans le bas est un obstacle aux échanges thermiques entre la masse de sable et le liquide qui circule.

Ces deux causes produisent chacune une part de l'effet sans qu'il soit possible de la définir. Malgré cela on doit conclure de la comparaison des résultats obtenus près de la paroi du réservoir et près du tube central que la

température est presque constante tout le long de celui-ci et qu'au contraire elle varie beaucoup sur celle-là.

§ 3. *Distribution des températures à l'intérieur du tube.* — La différence de température entre le liquide entrant et le liquide se déversant à l'air libre est restée à peu près égale à 0°,70 pendant toute la durée des opérations.

Nous avons remarqué, d'ailleurs, qu'en plongeant le réservoir thermométrique profondément dans l'espace annulaire entre les deux tubes, on obtenait sur la paroi du tube d'amenée et sur la paroi du gros tube des températures différant de 0°,3 et plus basses sur la paroi du tube intérieur.

Ces résultats permettent de considérer le congélateur comme étant à une température sensiblement constante dans toute sa hauteur.

Ils démontrent, en outre, qu'il y a échange de chaleur entre le liquide descendant et le liquide montant.

III. Forme du solide congelé.

Les dessins (*fig.* 3, Pl. 35) représentent les profils du solide congelé relevés quotidiennement pendant la période de congélation et pendant le dégel. — Le tableau II, p. 29, donne les épaisseurs déduites des sondages.

Il suffit de jeter les yeux sur les dessins pour reconnaître l'influence de la masse inférieure du terrain. Le solide est appointé vers le bas d'une manière très sensible.

Si l'appointement avait pu être attribué à de simples inégalités dans la conductibilité de la matière, ces inégalités auraient dû ralentir le réchauffement comme le refroidissement. Les dessins relatifs au dégel ne permettent pas ce doute. Le dégel a été très rapide dans la partie

inférieure ; il était sensible dans le bas vingt-quatre heures après l'arrêt de la machine à glace, alors qu'à la partie supérieure, au contraire, l'épaisseur de la couche de glace s'était accrue.

La forme ellipsoïdale du solide est, d'ailleurs, conforme à la théorie, car, d'après les renseignements fournis ultérieurement par M. Potier, ingénieur en chef des mines, les surfaces isothermes autour d'une source de chaleur rectiligne dans le cas de l'équilibre mobile sont des ellipsoïdes de révolution.

Le dégel de la masse a présenté une circonstance du plus haut intérêt. C'est le retour très rapide de la température de toute la masse à 0°. Vingt-quatre heures après l'arrêt de la machine à glace, la température au centre de la masse atteignant à peine 0°,3 ; un jour plus tard, cette température était 0 degré. Pendant la première journée, cette élévation de la température avait été accompagnée d'un accroissement de la couche de glace, qui a atteint $0^m,02$ en certains points.

IV. Rendement de la machine.

Les expériences ne permettent pas de déterminer dans combien de temps on obtiendrait en pratique une couche de glace d'épaisseur donnée.

Il est certain, en effet, que le réservoir étant isolé sur la plus grande partie de sa hauteur, le refroidissement de la masse est beaucoup plus rapide que si le tube était plongé dans un milieu indéfini. Dans la pratique, les tubes ne sont jamais isolés ; ils sont placés à des distances variant de 1 mètre à $1^m,50$ et forment un polygone fermé ; ils se trouvent donc sur plus de la moitié de leur circonférence dans des conditions analogues à celles de l'expérience. Les zones d'action se limitent les unes les autres.

Du côté tourné vers l'extérieur, les conditions sont tout à fait différentes. Le terrain environnant est une source de chaleur dont l'effet est très puissant, comme le prouvent les phénomènes observés dans la partie inférieure des tubes. Mais cet effet est difficile à évaluer.

Telles qu'elles ont été exécutées (*), les expériences permettent simplement une évaluation grossière du temps nécessaire pour que les couches de glace de deux tubes juxtaposés se rencontrent.

Bien qu'il soit impossible de rien préciser sur le rendement, les deux considérations suivantes ont un grand intérêt pratique :

1° Le rendement de la machine diminue à mesure que la couche de glace augmente.

En effet, les calories négatives produites par la machine à glace sont absorbées soit par le terrain, soit par les déperditions sur les parois de la tuyauterie et du congélateur de la machine. A mesure que la couche de glace augmente en épaisseur, la quantité de chaleur qui la traverse diminue, et la température du liquide en circulation tend à s'abaisser. Mais cet abaissement de température provoque un accroissement des déperditions. Dans la pratique des appareils à glace, il est très difficile d'obtenir des bains à des températures inférieures à —25 degrés. On devra donc considérer cette température comme la plus basse que la méthode permette d'employer.

2° Il y a intérêt pour la bonne utilisation du froid dans le tube à avoir des températures basses.

Nous avons déjà établi, en effet, que la quantité de cha-

(*) Pour faire une expérience concluante, il aurait été intéressant de supprimer la couche de paille qui entourait le réservoir sur la moitié de la circonférence. Dans ces conditions, on aurait obtenu des épaisseurs de glace variables dans une section horizontale comme dans la pratique.

leur qui passait du tube central à la surface du solide congelé, avait au numérateur le facteur $\theta_2 - \theta_1$, qui n'est autre chose que le nombre de degrés négatifs de la température du liquide en circulation.

En appelant n ce nombre de degrés, la quantité de chaleur qui traverse, dans l'unité de temps, une couche d'une épaisseur donnée, peut se mettre sous la forme :

$$nA,$$

A étant une constante qui dépend des rayons limitant la couche congelée et du coefficient de conductibilité.

Nous avons vu, d'autre part, que cette quantité de chaleur se décomposait en plusieurs autres appelées q, q', q'', q''', parmi lesquelles q, q', q'' représentent l'effet utile produit et ne dépendent pas du temps, tandis que la dernière q''', qui est une déperdition, est proportionnelle au temps : $q''' = at$. Si t désigne un laps de temps pendant lequel A ne varie pas sensiblement, la quantité de chaleur qui passe pendant ce temps est nAt ; mais la portion utilisée n'est que $nAt - at$. Il est, dès lors, évident que cette portion est d'autant plus grande que $nA - a$ est plus grand aussi. Le rapport $\frac{nA - a}{nA}$ mesure l'économie du système employé.

Le rendement dépend de deux éléments. Il est certain que si on annule les déperditions en dehors du terrain en supprimant la circulation du liquide incongelable, il ne dépend plus que d'un seul élément, le nombre n de degrés de la source de froid.

DEUXIÈME PARTIE

EXPÉRIENCES SUR LA RÉSISTANCE DES TERRAINS CONGELÉS.

I. *Généralités.* — Le second sujet sur lequel ont porté les expériences est la résistance de matières congelées.

Ces expériences ont consisté dans l'écrasement à la presse hydraulique d'un certain nombre de cubes et dans l'essai de briquettes à la traction.

Ces expériences ont un caractère industriel : elles n'ont pas la précision d'expériences de laboratoire.

D'ailleurs, la précision est très difficile à obtenir en pareille matière. Il n'est pas aisé de connaître la température d'un cube gelé que l'on retire d'une enceinte refroidie au moment où on l'écrase sous la presse ; ce bloc n'est certainement pas à la même température dans toute sa masse, les parois se réchauffant plus vite que l'intérieur ; d'ailleurs, pour observer la rupture, il est nécessaire de laisser ces parois au contact de l'air.

Dans ces expériences, nous avons admis que des cubes sortant d'une enceinte à *n* degrés et portés immédiatement sous la presse, restaient à *n* degrés : comme la résistance va croissant à mesure que la température diminue, le chiffre donné par l'expérience est certainement inférieur au chiffre réel.

Nous avons admis aussi que les cubes ayant séjourné plusieurs heures dans des vases disposés au sein d'un bain à *n* degrés étaient eux-mêmes à *n* degrés.

Enfin, nous avons considéré que des cubes gelés, exposés à l'air libre, n'étaient revenus à 0 degré qu'au bout d'une heure d'exposition.

Nous nous sommes, d'ailleurs, appliqué à multiplier les essais plutôt qu'à leur donner une grande précision.

Les essais ont porté sur le sable naturel gelé à diverses températures et avec des degrés divers d'humidité ; sur des mélanges à proportions définies d'eau, de sable et de glaise à modeler ; enfin, sur des cubes de glace pure.

II. *Essais sur le sable mélangé d'eau.* — De même qu'il est difficile de connaître exactement une température, il est assez malaisé d'obtenir des bains à des températures déterminées. Pendant que le tube d'expérience fonctionnait, la température du bain dans le congélateur restait comprise entre —14 et —17 degrés et les expériences de résistance pouvaient facilement être faites aux environs de ces températures. Lorsque le tube a cessé de fonctionner, la température du bain est descendue jusqu'à —26 degrés et elle s'y est maintenue suffisamment longtemps pour que les cubes gelés aient pu prendre une température peu différente.

Nous avons pu obtenir des indications suffisamment probantes dans les environs de — 10°, — 12° et — 14° de — 25° et près de 0°. Avec ces indications, il est possible de tracer une courbe donnant, avec une erreur de moins de 5 kilogrammes par centimètre carré, la résistance à l'écrasement du sable gelé.

Pour les températures intermédiaires, nous nous sommes contentés d'écraser des cubes ayant subi des réchauffements plus ou moins longs et de constater que la résistance allait en décroissant selon que le réchauffement avait été plus ou moins long.

Nous signalerons, avant de donner les chiffres, les difficultés que nous avons éprouvées pour mouler et démouler les cubes ; la glace pure se démoule très aisément, grâce à la fusion d'une légère couche qui facilite le glissement de la masse ; les cubes de sable, au contraire, par une fusion superficielle, créent un intermédiaire rugueux entre la masse gelée et la paroi du moule ;

cet intermédiaire s'oppose au démoulage et dégrade le cube. Après quelques tâtonnements, nous avons obtenu de bons résultats avec des moules dont les parois avaient un fruit de 1/20 et étaient recouvertes d'une couche d'huile incongelable; dans ces conditions, le premier effet du réchauffement était de rendre fluide la couche d'huile épaissie par l'effet du froid, et, en frappant légèrement sur les parois, la masse gelée se détachait sans grande peine.

L'observation de la rupture s'est faite au moyen du manomètre; à mesure que la pompe était manœuvrée, on voyait augmenter la pression graduellement jusqu'à une certaine limite, puis diminuer tout d'un coup; à ce moment, on découvrait généralement une fissure; en tout cas, en continuant d'actionner la pompe, les fissures ne tardaient pas à devenir apparentes.

Nous donnons la nomenclature des essais tels qu'ils ont été consignés dans les notes d'expérience (Tableau V. p. 32).

Les résultats de ces essais, représentés graphiquement, donnent sur un plan où les abcisses sont les températures et les ordonnées les résistances par centimètre carré, une série de points au milieu desquels nous avons tracé une courbe moyenne. Cette courbe est celle de la résistance du sable saturé d'eau (Pl. 35, *fig*. 6).

La saturation avait lieu pour un mélange d'environ 165 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable. Avec 200 grammes d'eau, il y avait plus que saturation, et, sans qu'on agitât la masse, l'eau se séparait du sable à la partie supérieure; c'est dans ces conditions que nous avons obtenu le maximum de résistance, et il est évident qu'il est inutile de mélanger des quantités d'eau supérieures, car on aurait obtenu un bloc non homogène formé à la partie supérieure d'une couche de glace et à la partie inférieure de sable gelé.

Lorsque la proportion d'eau diminue dans le sable, sa résistance diminue aussi. Les résultats seraient d'ailleurs moins intéressants dans ce cas, parce que les sables simplement humides n'exigent pas l'application de la congélation; leur traversée est un problème moins difficile.

Les essais à la traction dont les résultats sont consignés au tableau VI, n'ont été faits qu'à une seule température voisine de — 12°. Les briquettes extraites d'un bain où la température était de — 15°, ont été placées dans un seau avec de la sciure de bois gelée. Ce seau, entouré de drap, a été transporté des ateliers de MM. Rouart jusqu'au Trocadéro, où elles ont été essayées; à l'arrivée, la température de la sciure à l'intérieur du seau était de — 11°. On peut, sans grande erreur, évaluer à — 12° la température à laquelle les briquettes ont été brisées.

Enfin, nous avons fait sur des cubes taillés au sein du massif congelé, des expériences d'écrasement afin de vérifier s'il n'y avait pas de phénomène particulier de cristallisation dans les cubes gelés au moyen de moules; la vérification a été satisfaisante, et on peut considérer que les expériences ont une portée générale, la présence du sable empêchant toute cristallisation de se former.

III. *Essais sur des mélanges de sable, d'argile, d'eau.* — Des essais ont été faits sur des mélanges définis de sable, d'argile et d'eau.

Nous renvoyons au tableau VII pour les chiffres trouvés. Ils semblent indiquer que le sable peu humide résiste mieux quand il est mélangé d'argile.

La particularité la plus curieuse que nous ayons observée est la structure schisteuse de l'argile plastique congelée; cette structure s'est retrouvée pour le mélange à poids égaux d'argile et d'eau.

La rupture s'est produite dans les blocs d'argile pure par un glissement sur un plan à 45°.

IV. *Essais sur des blocs de glace pure.* — La glace pure a donné, dans les essais auxquels nous l'avons soumise, des résultats tout à fait inattendus ; tous les cubes se sont brisés sous une pression de 20 kilogrammes par centimètre carré à la presse hydraulique, en donnant une cassure généralement vitreuse.

Nous avons répété les expériences plusieurs fois, et les résultats ont été toujours pareils. Mais certains cubes, pour lesquels des précautions plus grandes avaient été prises, ont présenté des particularités intéressantes dans les derniers essais. Afin de varier les conditions dans lesquelles s'opérait la congélation, des moules avaient été placés dans le chlorure de calcium et d'autres dans un vase vide plongé dans le bain de chlorure.

Les premiers cubes se congelant rapidement ont donné de la glace opaque en cube pyramidé. Cette glace, nous l'avons observée sur un cube brisé dans le démoulage, présentait, selon les plans diagonaux, la marque évidente d'un changement de structure accusé par une transmission différente de la lumière dans les différents secteurs séparés par ces plans. Les seconds, au contraire, transparents sur la plus grande partie de la masse, n'avaient qu'un noyau central opaque, et la face supérieure, au lieu d'être en forme de pyramide, était simplement mamelonnée.

Dans ces divers cubes, les pyramides et mamelons ont été abattus et le parallélisme des faces soigneusement établi par un rodage.

Dans ces conditions, en manœuvrant doucement la pompe, l'un des blocs opaques s'est brisé à peu près comme ceux qui l'avaient précédé, en donnant des éclats

à l'aspect vitreux, mais, au centre, on voyait nettement une pyramide avec la pointe en bas (*).

En opérant de la même manière, le bloc suivant, au lieu de donner une cassure vitreuse, s'est décomposé en cinq fragments géométriques parfaitement réguliers ; une fente s'était produite aux quatre arêtes. En faisant cesser immédiatement la pression et en retirant le cube de la presse, les cinq fragments se sont détachés : la pyramide centrale déjà signalée, et quatre troncs de prismes au milieu desquelles elle se trouvait logée.

Les blocs transparents se sont brisés d'une manière absolument différente ; la ceinture transparente entourant le noyau opaque s'est fendillée comme un verre de lampe sur lequel on injecte de l'eau en pluie fine, et s'est renflée sous la pression.

Ces résultats, bien que leurs particularités soient dépourvues d'un intérêt pratique au moins immédiat, signalent nettement la fragilité de la glace. Une briquette de glace a donné une résistance de 10 kilogrammes par centimètre carré à la rupture par traction.

V. *Résultats.* — Les résultats pratiques de ces expériences sont les suivants :

Accroissement rapide de la résistance des terrains lorsque la température s'abaisse. — Le phénomène est représenté approximativement pour le sable saturé d'eau par une courbe parabolique dont l'équation est :

$$y = 0{,}153x^2 + 11x + 20,$$

dans laquelle y désigne le nombre de kilogrammes par centimètre carré et x le nombre de degrés au-dessous de 0.

(*) La structure particulière de ces cubes se retrouve dans les blocs de glace qui se forment dans les moules employés industriellement. Ces blocs de glace sont divisés par des plans très nets disposés comme sur la figure et se brisent selon ces plans.

Lorsque la proportion d'eau diminue et devient les 2/3 de celle qui est nécessaire pour la saturation, la résistance est aussi sensiblement réduite au 2/3 de sa valeur pour le sable saturé, et quand la proportion d'eau n'est plus que de 1/3, la résistance paraît réduite aussi à 1/3.

A la traction, la proportion d'eau joue un rôle plus considérable encore.

Le sable saturé d'eau à une température d'environ — 12° peut résister jusqu'à 40 kilogrammes par centimètre carré et on peut compter 30 kilogrammes avec sécurité si l'eau n'est pas en excès.

Avec la proportion en eau des 2/3 du poids nécessaire pour la saturation, la résistance est de 25 kilogrammes.

Mais la proportion de 1/3 ne donne qu'une résistance à peu près nulle.

En ce qui concerne l'influence de la proportion d'argile, d'eau et de sable, nous voyons que, pour les mélanges où la proportion d'eau et d'argile est, en poids, plus grande que celle du sable, les résultats sont peu différents; les grains de sable se trouvent noyés dans la masse boueuse dont ils ne modifient pas les conditions de résistance. La résistance de ces masses boueuses serait environ égale aux 2/3 de la résistance à la compression du sable gelé. Au delà, la résistance augmente à mesure que la proportion de sable devient plus considérable.

Ce changement de résistance est indiqué par une modification de la forme de la cassure ; dans le premier cas, cette cassure se produit par des fentes verticales, comme dans le cas de l'eau pure ; dans le second, les fentes sont à éléments verticaux et inclinés comme dans les cubes de sable pur.

A la traction, ces phénomènes sont bien indiqués ; le mélange moitié eau, moitié argile, a une résistance voisine de celle de l'eau pure (12 kilogrammes environ, la glace pure avait donné 10 kilogrammes). Cette résistance

augmente par l'introduction du sable beaucoup plus vite qu'à la compression.

La terre glaise pure a donné une résistance, à la compression et à la traction, égale à la moitié de celle du sable saturé d'eau.

Résumé. — En résumé, les expériences ont mis en lumière les points suivants :

1° Les phénomènes thermiques qui se passent à l'intérieur du tube sont de peu d'importance, la viscosité du liquide y joue un grand rôle ;

2° La forme du solide congelé et la distribution des températures au sein de ce solide se rapprochent de ce qu'ils seraient dans le cas de l'équilibre mobile des températures ;

3° L'espace de temps dans lequel la température de la masse congelée revient à zéro, lorsque la machine à glace s'arrête, est très court, et le dégel se fait sentir au-dessous du tube peu de temps après l'arrêt ;

4° Il n'est pas possible d'obtenir un bon rendement avec l'intermédiaire d'un liquide incongelable lorsque la couche atteint une épaisseur notable ;

5° L'accroissement de la résistance des matières congelées à la compression lorsque la température s'abaisse est très rapide, cette résistance étant très faible dans les environs du point de fusion de la glace.

6° La variation de la résistance, selon la proportion d'eau contenue par le sable, est considérable : le maximum correspondant à la saturation complète.

. — TABLEAUX COMPARATIFS DONNANT LES TEMPÉRATURES SUIVANT LE RAYON A DIVERSES HAUTEURS.

N° 1. — Tube situé à 0m,50 au-dessous de la surface.

DATES.	R =	0,085	0,125	0,175	0,225	0,275	0,325	0,375	0,425	0,475	0,525	0,575	0,70
octobre.	θ mesuré. .	»	−6,6	−3,9	−1,4	+0,4	+1,7	+2,8	+2,2	»	»	»	6,9
	θ calculé . .	−10,0	−6,6	−3,6	−4,4								
octobre.	θ mesuré. .	»	−8,2	−5,45	−3,3	−1,6	−0,4	+0,5	+1,3	+2,0	+2,5	+3,1	+4,2
	θ calculé . .	−11,4	−8,2	−5,4	−3,3	−1,6							
octobre.	θ mesuré. .	»	−9.0	−6,7	−4,5	−2,9	−1,1	−0,5	+0,2	1,0	+1,2	+1,6	+2,6
	θ calculé . .	−12,0	−9,0	−6,2	−4,2	−2,6	−1,4						

N° 2. — Tube situé à 2 mètres au-dessous de la surface du terrain.

DATES.	R =	0,085	0,12	0,17	0,22	0,27	0,32	0,37	0,42	0,47	0,52	0,57	0,70
octobre.	θ mesuré. .	»	− 9,2	−4,4	−1.2	+0,9	+2,8	+4,2	»	»	»	»	+8,8
	θ calculé. .	−13,75	− 9,2	−4,6	−1,2								
octobre.	θ mesuré. .	»	− 9,6	−5,6	−3,0	−1,1	0	+0,9	+1,6	+2,0	+2,6	»	+4,4
	θ calculé. .	−13,22	− 9,6	−6,0	−3,25	−1,1							
octobre.	θ mesuré. .	»	−10,4	−6,6	−3,9	−1,8	−0,4	+0,9	+2,0				
	θ calculé. .	−13,9	−10,4	−6,1	−4,2	−2,1	−0,4						

N° 3. — Tube situé à 1m,25 au-dessous de la surface.

DATES.	Distance à l'axe. R =	0,085	0,115	0,165	0,215	0,265	0,315	0,365	0,415	0,465	0,515	0,565	0,615	0,70
7 octobre.	θ mesuré . .	»	−10,2	−5,6	−2,3	»	1,9	»	4,2	»	5,9	»	»	7,4
	θ calculé . .	»	»	−5,4										
8 octobre.	θ mesuré . .	»	−10,9	−6,8	−4,1	−1,8	−0,3	+0,8	+1,7	+2,4	+2,8	+3,4	»	5,2
	θ calculé . .	14,1	−10,9	−7,1	−4,3	−2,1	−0,3							
9 octobre.	θ mesuré . .	»	−11,6	−8,0	−6,2	−3,4	−1,6	−0,3	+0,4	+1,0	+1,5	+1,9	»	3,2
	θ calculé . .	14,6	11,6	8,1	−5.5	−3,5	−1,7	−0,3						
11 octobre.	θ mesuré . .	»	−12,2	−8,9	−6,6	−4,6	−3,3	−1,9	−0,8	+0,2	»	+0,6		
	θ calculé . .	14,9	−12,2	−9,0	−6,6	−4,8	−3,3	−2,0	−0,8					

Le 7 octobre $\alpha = 29{,}07$ Le rayon où $\theta = 0$ est 0,254
8 — $\alpha = 24{,}22$ — — 0.324
9 — $\alpha = 22{,}53$ — — 0,376
11 — $\alpha = 20{,}45$ — — 0,454

La quantité θ est de la forme $2\pi K\alpha$; α étant une fonction des températures et des rayons, nous donnons les valeurs du facteur α.

Observations.

Il a été dressé deux courbes (Pl. 35, *fig.* 4) pour représenter la distribution des températures sur le rayon à 1m,25 au-dessous de la surface, le 9 et le 11 octobre. Ces courbes représentent la distribution obtenue par le calcul. Les points situés en dehors ont été fournis par l'expérience. Deux autres courbes (Pl. 35, *fig.* 5) représentent les observations faites les 25 et 26 septembre à la même profondeur. La température du liquide en circulation était environ 13°,5 le 25 et 14°,2 le 26. Les résultats relatés ont été observés après six heures de marche de la machine. Nous n'avons pas pensé qu'il y eut intérêt à faire connaître les résultats obtenus à 0m,50 et 2 mètres de profondeur. Les courbes obtenues d'heure en heure les 25 et 26 septembre ressemblent à celles qui ont été tracées ; nous nous sommes contentés d'en indiquer deux.

Dans le tableau n° 3, le 9 octobre, on remarque un écart considérable entre la température calculée et observée à 0m,215 de l'axe. Cet écart doit sans doute tenir à une erreur de lecture ; sa grandeur rend cette hypothèse probable.

II. — TABLEAU DONNANT LES RÉSULTATS DES SONDAGES EFFECTUÉS DU 6 AU 22 OCTOBRE 1885.

DATES.	DISTANCE à la surface de la masse.	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
7 octobre, à 8h 45 soir.	R à droite. .	0,225	0,257	0,260	0,249	0,252	0,243	0,218	0,250	
	R à gauche.	0,223	0,250	0,262	0,251	0,218	0,275	0,257	0,246	
8 octobre, à 9 heures soir.	R à droite. .	0,271	0,307	0,309	0,299	0,313	0,297	0,282	0,288	
	R à gauche.	0,285	0,300	0,314	0,302	0,301	0,328	0,298	0,266	
9 octobre, à 9 heures soir.	R à droite. .	0,309	0,354	0,358	0,352	0,353	0,338	0,320	0,313	0,247
	R à gauche.	0,328	0,347	0,364	0,363	0,355	0,384	0,331	0,290	0,191
10 octobre, à 9h 30.	R à droite. .	0,351	0,401	0,412	0,396	0,391	0,390	0,354	0,330	0,240
	R à gauche.	0,372	0,395	0,420	0,413	0,401	0,430	0,386	0,321	0,236
11 octobre, à 9h 30.	R à droite. .	0,388	0,440	0,453	0,444	0,428	0,428	0,384	0,353	0,253
	R à gauche.	0,400	0,439	0,465	0,465	0,423	0,477	0,426	0,358	0,251
12 octobre, à 5h 30 soir.	R à droite. .	0,415	0,465	0,482	0,493	0,463	0,455	0,400	0,378	0,273
	R à gauche.	0,431	0,475	0,496	0,499	0,470	0,492	0,435	0,371	0,266
13 octobre. à 4 heures soir.	R à droite. .	0,433	0,467	0,505	0,497	0,475	0,463	0,409	0,362	0,185
	R à gauche.	0,440	0,483	0,515	0,513	0,475	0,494	0,460	0,366	0,191
14 octobre, à 4 heures soir.	R à droite. .	0,417	0,467	0,499	0,503	0,473	0,462	0,391	0,330	
	R à gauche.	0,425	0,486	0,511	0,512	0,480	0,493	0,447	0,342	
17 octobre, à 4 heures soir.	R à droite. .	0,360	0,440	0,467	0,456	0,423	0,391	0,318	0,145	
	R à gauche.	0,373	0,442	0,473	0,484	0,435	0,425	0,374	0,275	
22 octobre, à 4 heures soir.	R à droite. .	»	0,277	0,332	0,312	0,288	0,198			
	R à gauche.	»	0,255	0,340	0,356	0,215	0,172	0,168		

Le 16 octobre à la surface R = 0,385
17 — — R = 0,225

Observations.

I. — Les épaisseurs mesurées directement ne donnent pas les mêmes résultats

que le calcul. En calculant, en effet, au moyen des courbes de distribution des températures la position de la zone à 0°, on la trouve plus près de la paroi que la surface résistante sur laquelle la sonde s'arrêtait. Cela tient à ce que, entre les parties du terrain à l'état solide et celle à l'état fluide, il existe une zone dont la consistance est analogue à celle d'un sorbet ; c'est la zone où la glace est en voie de formation.

II. — En jetant les yeux sur le dessin du solide, on voit du côté gauche à la hauteur de 1^{m},25 un creusement dans la masse gelée. Ce creusement est dû à la circonstance suivante : le 10 octobre, après avoir fait le sondage par l'orifice situé à 1^{m},25 de profondeur, on a oublié de replacer le bouchon de bois ; l'eau s'est écoulée et il s'est produit un assèchement local, dont l'effet a été de modifier la conductibilité du terrain. Pendant le dégel on voit l'influence de cet assèchement plus nettement encore.

III. — La nature du sol était légèrement variable selon la hauteur, comme il est indiqué dans le tableau suivant :

PROFONDEUR.	NATURE DU TERRAIN RAMENÉ PAR LA SONDE à droite et à gauche.
0,25	Sable peu argileux, grossier.
0,50	— —
0,75	— —
1,00	Sable grossier plus argileux, très aquifère.
1,25	— —
1,50	Sâble rougeâtre grossier plus argileux.
1,75	Sable rouge argileux fin.
2,00	— —

III. — TABLEAU COMPARATIF DES TEMPÉRATURES AU FOND DES DIFFÉRENTS TUBES.

Températures au fond des tubes.

DATES.	0^{m},25	0^{m},50	0^{m},75	1^{m},00	1^{m},25	1^{m},50	1^{m},75	2^{m},00	2^{m},25	2^{m},50	2^{m},75
6 octobre, 10 heures soir.	»	»	−5,2	−5,3	−7,2	−5,6	−6,0	− 6,0	−1,8	+9,4	+11,9
7 octobre, 12 heures nuit.	»	−5,0	−6,7	−6,7	−8,2	−8,0	−6,9	- 7,7	−3,0	+2,6	+ 8,4
8 octobre, 10^{h} — 12^{h} nuit.	−7,4	−7,4	−7,9	−8,4	−9,7	−9,7	−9,4	− 9,6	−4,4	+6,1	+ 9,4
9 octobre, nuit.	−8,0	−8,2	−8,5	−9,4	−9,4	−9,9	−9,9	−10,4	−5,0	+5,2	+ 8,3
10 octobre, nuit.	»	−8,4	»	»	−9,9	»	»	−10,0	−5,4	+4,4	+ 7,6
11 octobre, nuit.	»	−8,8	»	»	»	»	»	»	»	+3,7	+ 6,7
Distance entre le fond des tubes et la paroi du tube central :	0,008	0,010	0,003	0,005	0	0,002	0,010	Distance verticale au fond du tube.	0,065	0,315	0,5

A part les mesures faites le 6 octobre, toutes les autres ont été faites avec le même thermomètre. Il ne faut d'ailleurs y voir que des indications et non des mesures précises, car on n'a pas laissé le thermomètre séjourner le même temps dans les divers tubes. Ce qui ressort nettement du tableau, c'est que pour les profondeurs de 1 à 2 mètres il n'y a pas de grandes différences; il n'en est pas de même pour les profondeurs de 0m,25, 0m,50 et 0m,75, car pour ces profondeurs les températures vont en décroissant de haut en bas et elles sont sensiblement inférieures aux autres. (Influence du tube central et aussi de la tige portant les tubes thermométriques.)

Pour les profondeurs de 2m,25, 2m,50, 2m,70, les tubes étaient prolongés jusqu'à l'axe du réservoir et on a mesuré les distances verticales des bouts des tubes au fond de la calotte sphérique du tube central.

IV. — TABLEAU DES TEMPÉRATURES OBSERVÉES PRÈS DE LA PAROI DU RÉSERVOIR.

Températures près de la paroi du réservoir, R = 0,70.

DATES.	PROFONDEUR.	0m,25	0m,50	0m,75	1m,00	1m,25	1m,50	1m,75	2m,00	2m,25
		degr.	degr.	degr.	degr.	degr.	degr.	degr.	degr.	degr.
26 septembre.	A droite. .	10,2	11,0	»	»	12,0	»	»	12,6	
	A gauche.									
6 octobre . .	A droite. .	»	8,7	9,2	9,6	10,0	10,3	10.8	10,9	
	A gauche.									
7 octobre . .	A droite. .	»	5,4	5,7	5,9	6,4	6,9	7,5	8,4	
	A gauche.									
8 octobre . .	A droite. .	4,3	4,2	4,2	4,4	4,4	5,2	6,0	4.9	
	A gauche.									
9 octobre . .	A droite. .	2,8	2,6	2,6	2,6	3,2	3,5	4,3	4 8	
	A gauche.	»	2,2	1,0	1,9	2,2	2,5	3,2	4,5	6,3
10 octobre . .	A droite. .	2,2	2,1	2,2	2,0	3,0	3,0	3,8	4,8	6,2
	A gauche.	2,2	»	1,6	»	»	2,3	»	3,9	5,7
11 octobre . .	A droite. .	1,5	1,4	1,5	1,3	2,0	2,2	3,0	3,8	5,3
	A gauche.	1,5	1,35	1,0	0,8	1,0	1,2	1,8	3,0	4,7

Le tableau montre très clairement que la différence des températures entre le haut et le bas n'a fait que s'accentuer; d'ailleurs le point où la température était minimum s'est déplacé vers le bas.

V. — Résultats des essais à la compression de cubes congelés.

Mélanges de sable et d'eau.

DATES.	TEMPÉRATURES.	RÉSISTANCE par $\overline{0,01}^2$ en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1883 8 oct.	—12°	à peu près 120	Quatre blocs ont été écrasés et ont donné des résultats analogues. Deux de ces blocs ont été transportés au pied de la presse enduits de matières grasses au sein d'un bain de chlorure de calcium à —12°. Mais les résultats ne sont qu'approximatifs parce que la pompe était actionnée par la force motrice de l'usine, c'est-à-dire très brutalement. L'aiguille du manomètre avait des oscillations très fortes et les chiffres indiqués correspondent à sa position moyenne.	
9 oct.	—12°	120	Mêmes observations pour les trois cubes qui ont donné ce résultat.	
9 oct.	—17°	148 à 150	Un seul cube de dimensions plus fortes que les précédents. Tous ces essais peuvent être considérés comme préliminaires. Nous ne les rapportons que pour mieux faire ressortir qu'ils s'accordent avec les mesures plus précises faites avec une pompe à main dans tout ce qui suit.	
13 oct.	—10°	118		(1) Élévations de deux faces perpendiculaires.
13 oct.	—10°	120 (1)		
13 oct.	entre —10° et —2°	75 75 24 24	Ces blocs ont subi des réchauffements de durée différente à l'air libre : de 5 à 6 minutes pour les premiers et de 1/4 d'heure pour les seconds. Aucun pourtant n'était arrivé à la température de la glace fondante.	
15 oct.	—25°	200	La rupture s'est produite très nettement pour ce bloc ainsi que pour les suivants; il n'y a pas eu trace de foirement sur les bords.	
15 oct.	—25°	175	Ce bloc n'avait pas ses faces parallèles et il s'est brisé avant que le contact fût établi sur toute la surface.	
15 oct.	—25°	170	Bloc cylindrique dont la hauteur était très supérieure au diamètre.	
17 oct. 17 oct.	—14° —14°	131 131	Ces deux blocs provenaient d'un mélange d'eau et de sable non défini, mais où le sable était saturé d'eau.	
17 oct. 17 oct.	—14° —14°	138 144 (2)	La proportion du mélange d'eau et de sable était 200 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable. Dans ces conditions il y a léger excès d'eau. Le premier de ces blocs était cylindrique, circonstance qui explique la diminution de résistance.	(2) Élévations selon deux faces perpendiculaires.
17 oct	—14°	48	La proportion du mélange étant de 50 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable. Le second bloc était cylindrique.	
17 oct.	—14°	43		La plupart des ruptures se sont produites comme celles dont le croquis est donné.
17 oct	entre —10° et —5°	96 63 88 70 79 79 75	Ces blocs ont été taillés dans la masse qui entourait le tube Pœtsch, simplement pour vérifier que les cubes gelés dans des moules n'avaient pas subi de phénomène de cristallisation particulier comme l'eau pure.	
17 oct.	0°	17	Bloc ayant séjourné une heure à l'air libre.	Ces blocs n'ont pas à proprement parler, subi de rupture, mais ils s'aplatissaient sans présenter de fissures sous une pression qui restait à peu près constante au manomètre.
17 oct.	0°	24	Ce bloc a été moins longtemps exposé à l'air.	
17 oct.	entre 0° et 5°	43 43	Blocs ayant séjourné un quart d'heure à l'air et ne présentant pas encore de traces de dégel.	
17 oct.		33	Ce bloc est dans les mêmes conditions, mais il est cylindrique.	

VI. — Résultats des essais a la traction de briquettes congelées.

Mélanges de sable et d'eau.

DATES	TEMPÉRATURES	NOMBRE de kilogrammes par cent. carré	OBSERVATIONS	CROQUIS ET REMARQUES
1885 16 octobre.	entre -11° et -15°.	34,5 25 25 29 30,5 35 29	Les sept briquettes avaient été formées avec un mélange à proportions non définies, mais où le sable paraissait saturé d'eau. Les écarts n'ont rien de surprenant; d'ailleurs les bulles d'air qui avaient pu séjourner dans la masse suffisent à expliquer ces variations.	Les briquettes, après avoir été cassées, étaient portées sous la presse hydraulique ; les résultats donnés par ces essais sont de peu de précision. Mais ils suffisent pour indiquer le rapport entre les résistances à l'écrasement du sable à divers degrés d'humidité. Nous avons constaté que lorsque la proportion d'eau variait de la saturation à la proportion de 100 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable, la résistance variait dans le rapport de 3 à 2, et lorsque la proportion d'eau tombait à 50 grammes d'eau pour 1 kilogramme de sable à peu près dans le rapport de 3 à 1. Ces indications nous ont dispensé de multiplier les essais de cubes.
		35,5 41,5 32 43	Mélange de 1 kilogramme de sable avec 200 grammes d'eau ; l'eau en excès s'écoulait par les fentes du moule.	
		25 28,5 24 22	Mélange de 1 kilogramme de sable avec 100 grammes d'eau.	
		3,5	Le mélange de 1 kilogramme de sable avec 50 grammes d'eau n'offre qu'une faible résistance ; la plupart des huit briquettes péparées se sont brisées pendant qu'on les fixait dans l'appareil ; la seule qu'on soit parvenu à fixer s'est brisée sous la plus faible charge additionnelle ; le maximum de la résistance qu'on puisse attribuer à cette matière dans ces conditions est celle qui est inscrite.	

VII. — Résultats des essais a la compression de cubes congelés.

Mélanges de sable, eau et argile.

DATES.	TEMPÉRATURES.	RÉSISTANCE pour $\overline{1,01}^2$ en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1885 9 oct.	—15°	80 70 65 65	Quatre cubes d'argile pure. (Glaise à modeler.)	Argile pure.
10 oct.	—15° —15°	84 100	Deux cubes dont la proportion était pour 1 k. de sable, 200 gr. d'eau et 200 gr. d'argile.	
	—15° —15°	93 104	Proportion pour 1 kilogr. de sable : 125 gr. d'eau, 125 gr. de glaise.	
	—15° —15°	104 104	1 kilogr. sable, 100 gr. eau, 100 gr. argile.	(1) Élévation selon A B. Plan. A B
	—15° —15°	104 84	1 kilogr. sable, 50 gr. eau, 50 gr. argile.	
12 oct.	—17°	94 (1)	1 kilogr. sable, 2 kilogr. eau, 2 kilogr. argile.	
	—17° —17°	94 (2) 104	1 kilogr. sable, 2 kilogr. eau, 1 kilogr. argile.	(2) (3) (4) Elévations selon deux faces perpendiculaires.
		104	1 kilogr. sable, 500 gr. eau, 500 gr. argile.	
	—17°	109 113	1 kilogr. sable, 333 gr. eau, 333 gr. argile.	
	—17°	122 118	1 kilogr. sable, 200 gr. eau, 200 gr. argile.	
	—17°	122 118	1 kilogr. sable, 125 gr. eau, 125 gr. argile.	
	—17°	122 (3) 130	1 kilogr. sable, 100 gr. eau, 100 gr. argile.	
	—17°	80 (4) 70	1 kilogr. sable, 50 gr. eau, 50 gr. argile.	
17 oct.	—14°	78	Moitié argile, moitié eau.	
	—14°	74	1 kilogr. sable, 500 gr. eau, 500 gr. argile.	
			Excepté les deux derniers, tous les essais ont été faits avec la pompe actionnée par l'arbre moteur de l'atelier. Les résultats ne sont donc pas d'une grande précision.	Dans les blocs où il y avait plus de 200 gr. d'eau pour 1 kilogr. de sable, la rupture s'est produite par fentes verticales (croquis 2). Les fissures inclinées se sont montrées lorsque la proportion d'eau est arrivée dans les environs de 200 gr. et est descendue au-dessous.

VIII. — Résultats des essais a la traction de briquettes congelées.

Mélanges de sable, d'eau et d'argile.

DATES.	TEMPÉRATURES.	RÉSISTANCE par $\overline{0,01}^2$ en kilogr.	OBSERVATIONS.	CROQUIS ET REMARQUES.
1885 16 octobre	Entre — 11° et — 15°	22,5 22 17 23,50	Quatre briquettes de terre glaise à modeler. La texture des briquettes était schisteuse dans la partie brisée.	Décomposition du cube de glace pure.
		11,5 12,5 13	Mélange de glaise avec poids égal d'eau. — Vase molle. Texture schisteuse à la cassure.	
		19 19,5 18 16	1 kilogr. de sable pour 500 grammes de glaise et 500 grammes d'eau.	
		10	Briquette en glace opaque	

N° 54

NOTE

SUR

L'ORGANISATION DU MOUVEMENT DES TRAINS

SUR LES CHEMINS DE FER DES ÉTATS-UNIS

Par M. ROEDERER, Ingénieur des ponts et chaussées,
Sous-Chef de l'Exploitation de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.

Dans un rapide voyage que j'ai fait aux États-Unis, dans le courant de l'été dernier, j'ai recueilli, sur l'organisation du mouvement des trains, des renseignements qui m'ont paru présenter assez d'intérêt pour être communiqués aux lecteurs des *Annales*.

Le système américain qui est, m'a-t-on affirmé, universellement adopté aujourd'hui dans ce pays, diffère essentiellement de ceux en usage non seulement sur les réseaux français, mais même, peut-on dire, sur tous les chemins de fer de l'ancien continent. Il était jusqu'à présent assez peu connu, ce qui tient, d'une part, à ce qu'il est relativement nouveau, au moins dans l'extension considérable qu'il a prise, et, d'autre part, à ce que les chemins de fer américains ont plutôt été étudiés jusqu'à présent au point de vue de la construction des lignes, de l'entretien de la voie, du matériel et des machines, qu'au point de vue de l'exploitation.

Avant d'aborder l'exposition de ce système, il convient

de rappeler l'ordre d'idées dans lequel s'est établie notre réglementation du mouvement.

Chez nous, nous faisons partager à une grande quantité d'agents la responsabilité de cet important service. Ces agents, même d'un ordre très peu élevé (conducteurs-chefs, chefs de petites gares, etc.), doivent appliquer, chacun en ce qui le concerne, des règles assez compliquées, qu'ils peuvent ne pas toujours bien comprendre, qui exigent beaucoup d'attention et de soin, règles tutélaires cependant, qui ont tout prévu, mais rien prévu de trop et que, pour cette raison, on ne saurait simplifier, règles enfin dont la sécurité dépend d'une manière presque exclusive. L'inconvénient qu'il y a à mettre ainsi la vie de nos voyageurs sous la sauvegarde d'agents inférieurs, peu payés, d'une intelligence qui n'est pas en général au-dessus de leur grade, est corrigé par ce fait qu'une seule faute d'un seul agent ne peut pas, dans la plupart des cas, amener d'accident. Nos règlements, complétés, d'ailleurs, par des mesures accessoires (block-system, cloches, enclenchements), sont ainsi faits, au contraire, qu'il faut, pour qu'un accident ait lieu, plusieurs fautes commises par plusieurs agents. La sécurité résulte donc de ce qu'il y a de grandes chances pour que, dans le même moment ou dans un intervalle de temps très limité, il ne se produise pas la combinaison des fautes nécessaires. En fait, on peut affirmer que ce système est excellent, et qu'en matière de sécurité, les chemins de fer français ne le cèdent à ceux d'aucune autre nation.

En Amérique, on a marché longtemps avec des règlements très rudimentaires; le trafic, réparti entre un grand nombre de lignes concurrentes, n'exigeait sur chacune que peu de trains; ceux-ci étaient donc suffisamment espacés pour qu'on n'eût pas à se préoccuper de leurs rencontres. Il n'en a plus été ainsi, quand les États de l'Ouest, rapidement colonisés, et ouvrant à la production

du bétail et du blé d'immenses étendues, ont donné lieu à un trafic de transit, dirigé de l'ouest sur l'est, qui a atteint en quelques années un développement énorme. Des lignes qui n'avaient que quelques trains par jour sont devenues le siège d'une circulation de 40, 50 trains journaliers dans chaque sens, quelquefois plus. Il a fallu prendre des mesures de précaution nouvelles et le *trains-despatcher* est né.

L'idée qui a présidé à sa naissance est simple : au lieu de confier la responsabilité à un grand nombre d'agents inférieurs, les Américains ont pensé qu'il était préférable de s'en rapporter à un agent unique sur chaque section. Cet agent appartenant à un corps spécial, bien payé (*), recruté sévèrement (**), est renseigné par le télégraphe sur la situation de chacun des trains qui parcourent sa section ; il est exclusivement chargé du soin de leur donner des ordres, soit au départ, soit par l'intermédiaire des gares traversées, et c'est sur lui que repose toute la responsabilité du service. C'est lui qui lance les trains (aucun train ne peut partir sans qu'il lui ait donné son nom, sa vitesse et sa marche); c'est lui qui les arrête, les fait croiser, les gare, etc. Toutes les modifications qu'il peut y avoir lieu de décider accidentellement, changement de garage ou de croisement, marche de trains spéciaux, envoi de la machine de secours, sont ordonnées par lui de son bureau.

Ce bureau est placé dans la gare la plus importante de la section. Les despatchers y ont généralement un service

(*) Un *despatcher* touche par an de 5 à 10.000 francs d'appointements.

(**) On définit ainsi, dans le compte rendu d'une séance de l'Association britannique tenue à Montréal, les diverses conditions d'aptitude qu'on doit demander à un despatcher. Il faut qu'un despatcher soit tranquille, sobre, méthodique, vif, intelligent, jeune, qu'il ait du sang-froid et de la mémoire, qu'il connaisse parfaitement le réseau, ses rampes, ses courbes, la position des voies de garage, les dimensions et les dispositions des gares, enfin le caractère et le degré d'intelligence des agents des trains.

de huit heures, pendant lequel il leur est défendu de fumer, de boire, de lire un journal, de recevoir une visite. Un stationnaire du télégraphe leur est adjoint. La section de chaque *trains-despatcher* varie entre 100 et 200 kilomètres et comprend de 15 à 30 gares.

Quant aux chefs de gare, ils sont dessaisis de toute intervention dans le mouvement des trains. Dans les gares intermédiaires, où le voyageur est rare et le trafic très peu de chose, le rôle essentiel du chef de gare est dans la réception et l'envoi des dépêches télégraphiques, qui sont extrêmement nombreuses dans ce système. Dans les gares plus importantes, un stationnaire spécial est chargé de ce rôle.

Le chef de gare doit régulièrement adresser au despatcher le nom de tout train qui traverse sa gare, ainsi que l'heure du passage. Accidentellement, il est chargé de remettre au conducteur-chef et au mécanicien les nouveaux ordres que le despatcher peut avoir à leur donner.

Pour que l'*operator* du poste (c'est le nom qu'on donne au chef de petite gare) puisse reconnaître le train auquel il a affaire, certaines compagnies veulent que le mécanicien jette à la gare, au moment de son passage, son nom, le numéro de sa machine, le nom ou le numéro du train (*), écrits sur un morceau de papier enroulé autour d'une pierre. D'autres compagnies exigent que les trains de marchandises marquent un instant l'arrêt : le temps nécessaire de lancer à la voix les mêmes renseignements. Quant aux trains de voyageurs (qui sur une même ligne ne sont jamais bien nombreux), elles admettent qu'ils se reconnaissent d'eux-mêmes.

Quoi qu'il en soit, le temps auquel chaque train passe

(*) Les trains de voyageurs ont seuls des numéros; les trains de marchandises sont désignés par le nom du conducteur-chef.

aux différents points de la ligne est noté par le despatcher sur un registre fait comme nos marches de trains, ou sur un graphique (ce dernier peu employé). Grâce à cette notation, il se rend compte à chaque instant de ce qu il y a lieu d'ordonner aux trains partants et quelles modifications il convient d'apporter aux ordres des trains déjà en route, où il doit garer les trains, où il doit les faire croiser, etc.; il sait également s'il doit envoyer la machine de secours ; et, d'après les renseignements qu'il reçoit en cas d'accident, la façon dont il convient d'établir le pilotage. En un mot, il est seul à connaître et à appliquer les règles assez compliquées et délicates qui doivent être chez nous à la connaissance de tous.

Cette organisation exige l'échange d'un nombre considérable de dépêches, qui seraient impossibles à envoyer, si, comme sur le réseau français, chaque gare où le fil est interrompu avait à recevoir et à retransmettre les dépêches. D'autre part, toutes les gares doivent toujours rester sur communication, puisqu'elles peuvent avoir toutes, à tout moment, des ordres à recevoir du despatcher. Les appareils télégraphiques employés ont permis de triompher de la difficulté; toutes les gares reçoivent en même temps toutes les dépêches qui circulent sur le fil affecté spécialement au mouvement des trains, d'un bout à l'autre de la section. Mais elles ne les lisent et ne les transcrivent que quand la dépêche est envoyée par le despatcher et qu'elle les concerne. Afin qu'elles en soient dûment prévenues, le despatcher, avant de télégraphier un ordre à une gare, appelle le nom de cette gare. Celle-ci annonce qu'elle a compris l'appel en lui renvoyant ce nom; après quoi la dépêche est lancée.

On se demandera peut-être ce que devient l'exploitation dans une organisation où tout dépend du télégraphe, quand le fil est coupé ou mélangé? Dans ce cas, très rare, m'a-t-on dit (car le réseau télégraphique est l'objet de

soins tout particuliers), on se sert des autres fils, qui n'ont pas d'affectation spéciale, ou encore de ceux des nombreuses compagnies de télégraphe, qui utilisent en général les voies des chemins de fer et se sont obligées par leur contrat d'obtempérer, en cas de besoin urgent, à toute réquisition qui leur serait faite. Enfin, comme suprême ressource, si le dérangement s'étend à tous les fils longeant la ligne, on arrête les trains de marchandises, qui sont les seuls qui ne puissent absolument marcher qu'avec l'aide du télégraphe.

C'est en effet le lieu de dire maintenant que les trains se distinguent en deux catégories, ceux qui ont une marche tracée, et ceux qui n'en ont pas. Les premiers sont tous les trains de voyageurs et les trains de messagerie ou de marchandises desservant les stations intermédiaires, en un mot, les trains dont il est indispensable que le public ou les gares connaissent exactement les heures de passage.

Les trains transportant les marchandises de transit (*throughfreight*), et ce sont de beaucoup les plus nombreux sur les lignes principales, n'ont pas de marche fixée d'avance. Ce sont des trains sauvages (*wildtrains*); ils partent à toute heure, comme le décide le despatcher, d'après les propositions de la gare qui les a formés ou les détient. Le despatcher, au moment du départ, leur donne leur nom, leur indique les particularités de leur marche et leur alloue la vitesse à laquelle ils devront circuler sur les différentes parties de la section. Le mécanicien et le conducteur-chef portent sur eux un livret qui donne, tout calculé, le temps que les trains doivent mettre pour passer d'une gare à la suivante, aux différentes vitesses qui peuvent être ordonnées. Enfin ils ont le livret de marche des trains à marches tracées et reçoivent la consigne de faire attention à ces trains, au cas où une distraction du despatcher ne les signalerait pas dans l'ordre donné.

Il y a toujours, sur une section un peu longue, une ou deux gares d'arrêt général. Ce sont des gares de relais d'ordres. Grâce à elles, le despatcher n'a pas à établir ses prévisions pour un trop long parcours, ni à distribuer des instructions que les incidents du service amèneraient trop souvent à changer.

Il peut arriver néanmoins que le despatcher ait à modifier, entre deux gares d'arrêt général, les ordres qu'un train a emportés ; le fait arrive même assez fréquemment. Dans ce cas, il envoie à l'un des postes non encore franchis par le train l'ordre nouveau que celui-ci doit recevoir ; on lui recommande d'attaquer, dans ce but, le poste le plus éloigné possible, mais il n'est pas rare que, le temps pressant, il soit obligé de s'adresser au premier poste à franchir. La gare qui a un pareil ordre à transmettre doit arrêter le train et arborer dans ce but, dans l'axe même du bâtiment, un petit signal à papillon ou à feu vert qui signifie *Arrêt*. Ce signal est absolument insuffisant et je n'ai pas compris comment on s'en contentait, sans chercher mieux. On sait, en effet, que les gares ne sont pas précédées en général de disques ou sémaphores avancés ; et comme d'autre part le signal en question est placé toujours au milieu du bâtiment des voyageurs, à l'endroit où nous mettons l'horloge, qu'on n'est donc pas maître de sa position, il est quelquefois dans des conditions détestables de visibilité. Le hasard m'a rendu témoin d'un incident qui m'a édifié à cet égard.

J'ajoute que, si le signal est mauvais, par contree ls précautions les plus minutieuses sont prises pour que le despatcher soit absolument certain que les instructions qu'il a envoyées ont été bien reçues par les gares, bien transmises aux agents qu'elles concernent, bien comprises par eux. A cet effet, dès que la gare a reçu l'ordre, elle le retourne au despatcher à titre de collationnement ; celui-ci répond : *correct*. Puis quand le train est arrivé, l'ordre

est remis par écrit au conducteur-chef et au mécanicien, qui le lisent et font connaître au chef de gare comment ils l'interprètent. Celui-ci adresse immédiatement une nouvelle dépêche indiquant cette interprétation au despatcher, qui répond une seconde fois : *correct*, et ce n'est qu'alors que le train peut partir.

On voit de quel usage incessant est le télégraphe et quelle quantité de dépêches doivent circuler sur le fil.

On voit aussi l'importance du rôle du despatcher et la responsabilité énorme qui pèse sur lui.

Cette organisation est complétée par l'institution du *droit à la voie*, qui a été conservée de la réglementation antérieure à l'adoption du système.

Le *droit à la voie* peut se définir *la formule du respect que les trains de classe inférieure doivent avoir pour les trains de classe supérieure* (*). Les premiers, même en l'absence d'ordres, ont à se garer, de leur propre initiative, de manière à ne pas être rencontrés par un train de classe supérieure qui les suit et à ne pas l'arrêter. Sur la voie unique, si un train de classe inférieure craint de ne pouvoir atteindre la gare où il doit croiser un train de classe supérieure, il doit s'arrêter dans une des gares précédentes, même en l'absence d'ordres et de sa propre initiative. Au contraire, le train de classe supérieure n'a pas à se préoccuper de ceux de classe inférieure qu'il peut rencontrer. Si ses ordres lui ont dit que l'un de ces trains se garerait pour lui à la station A, et qu'il n'y voie pas ce train garé, il n'en continue pas moins sa route; si l'ordre lui a fait connaître qu'il croiserait tel

(*) Les trains de classe supérieure sont les trains de marche tracée; les trains de classe inférieure sont les trains de marchandises qui n'ont pas (marche. Entre deux trains de classe supérieure, les express ont le pas sur le omnibus. Sur la voie unique, quand deux trains de sens opposé sont de mêm catégorie, celui qui marche vers l'Est (sens de la charge) a droit à la voi. contre celui qui marche vers l'Ouest (sens du vide).

train inférieur à la station B, et que ce train n'y soit pas, il dépasse la station B sans l'attendre (*).

Il semble qu'en conservant dans leur réglementation le droit à la voie, les Américains aient voulu remédier en partie aux inconvénients qu'ils ont reconnus au système du *trains-despatching*. Le droit à la voie a incontestablement un avantage sous ce rapport, mais il présente également un danger. L'avantage est d'abord d'intéresser dans une certaine mesure le personnel des trains de la classe inférieure à la sécurité : si un incident se produit qui déroute les prévisions du despatcher, et que celui-ci néglige de modifier ses ordres ou n'en ait pas le temps, l'initiative du mécanicien et du conducteur-chef y suppléeront. En outre, dans la même hypothèse d'un incident imprévu, les trains importants, les trains de voyageurs, ne sont pas arrêtés, puisqu'ils sont autorisés à suivre leur route sans s'inquiéter des trains qu'ils auraient dû rencontrer. D'autre part, on ne peut s'empêcher de penser qu'une pareille autorisation ouvre la porte à de bien redoutables erreurs.

Maintenant, que vaut toute cet organisation? Les Américains en sont très fiers et la considèrent comme le dernier mot du progrès. Elle est à coup sûr fort ingénieuse, fort intéressante et très originale. Mais c'est, à mes yeux, plutôt un expédient né des besoins particuliers de leur exploitation, qu'un système recommandable en soi.

Il faut se rappeler que le trafic de transit des grandes lignes varie d'un moment à un autre dans des proportions

---

(*) Pour être absolument exact, je dois dire que le train supérieur doit attendre l'autre jusqu'à 5 minutes après l'heure réglementaire de son départ de la gare. Cela n'a d'autre but que de remédier à de légères différences d'heures sur les montres des agents des deux trains.

Les gares américaines n'ont pas d'horloges intérieures; les agents des trains ne connaissent l'heure que par la montre qu'ils portent sur eux.

énormes; qu'on a à y faire face à des besoins rapides et imprévus, et que dans ces conditions, les règles en usage sur les réseaux français feraient sans doute assez mauvaise figure. Ces règles sont excellentes pour un trafic régulier, s'écartant peu d'une saison à une autre d'un mouvement moyen autour duquel il oscille. Mais elles sont de moins en moins tutélaires, à mesure que la proportion de trains irréguliers augmente. Si le nombre de nos trains facultatifs ou spéciaux croissaient jusqu'à être deux ou trois fois égal à celui des trains ordinaires, qui peut dire que nos agents des gares et des trains, déroutés par un service aussi différent de leur service habituel, ne seraient pas exposés à de graves confusions et à de dangereux oublis.

Une deuxième considération intervient. Nos règlements se prêtent peu à un mouvement tout à fait intense. Il suffit de jeter les yeux sur un graphique pour voir le vide qu'un train à allure rapide fait autour de lui parmi les trains à marche plus lente, qui doivent arriver au garage 15 ou 20 minutes avant son passage au même point. Cet effet, dejà sensible sur une marche théorique, l'est bien plus encore dans la pratique et il n'est pas rare de voir un train garé stationner fort longtemps avant de pouvoir reprendre sa route derrière le train pour lequel il s'est effacé. Comme on est naturellement obligé de tenir compte dans une certaine mesure de ces perturbations inévitables, la capacité effective d'une ligne en est plus ou moins fortement réduite.

Dans le système américain, il n'en est pas ainsi : le despatcher tient tous les trains dans sa main, il correspond avec eux, il peut les garer au dernier moment, les faire stationner le minimum de temps nécessaire et obtenir ainsi le maximum de rendement.

Mais, où ce résultat est surtout sensible, c'est sur les lignes à voie unique (et il y en a beaucoup et d'impor-

tantes, en Amérique). Sur de pareilles lignes nous ne pouvons lancer un facultatif ou un spécial qu'à l'aide d'une combinaison d'annonces qui exige plusieurs heures, ou bien, si dans le cas d'extrême urgence, l'on fait marcher le train à coup de dépêches télégraphiques, il ne peut s'avancer que de gare en gare, en demandant chaque fois la voie devant lui. Il en de même pour les changements de croisements de trains réguliers ; de même encore, si un train est lancé hors tour. Tout cela donne beaucoup de temps perdu, et réduit en somme à un assez petit nombre de trains la circulation que nous pouvons pratiquement faire passer sur une voie unique.

Le système américain échappe à ces inconvénients et se prête, par conséquent, à une utilisation bien plus complète de la voie ferrée. L'expérience est d'ailleurs là pour le démontrer : nous avons circulé entre Buffalo et Chicago sur une ligne à voie unique de 536 milles (862 kilomètres) de longueur. Cette ligne, au moment de la saison des grands transports, a un mouvement moyen dans chaque sens de 10 trains de voyageurs de diverses vitesses, et de 30 trains de marchandises, soit 80 trains en tout. Et il y a des jours où cette moyenne est dépassée (*).

Ce sont certainement de brillants résultats ; mais quoi qu'en disent les ingénieurs américains, le système qui a permis de les obtenir n'est pas de ceux qu'on puisse recommander en France. On a sacrifié, je le crains, à l'impérieux besoin de faire passer beaucoup de trains sur des lignes peu faites pour les recevoir, une nécessité que nous considérons comme plus impérieuse encore, celle de garantir par les plus minutieuses précautions les vies humaines qui nous sont confiées. L'impression qui s'est

(*) Sur la ligne à voie unique de Pittsburgh à Saint-Louis, que nous n'avons pas parcourue, on m'a dit qu'on avait fait jusqu'à 75 trains dans chaque sens.

dégagée pour moi de cette étude est que les Américains sont imprudents; on la partagera sans doute.

Mais ce n'est là qu'une impression; il faudrait, pour décider sans parti pris, ce que valent les deux organisations, les comparer par leurs résultats, et chiffrer, à l'aide de statistiques officielles, combien les Américains et nous, nous avons de tués et de blessés pour un même nombre de voyageurs kilométriques transportés. Il n'existe pas malheureusement, aux États-Unis, de statistique officielle; on est obligé de recourir, en ces matières, à une publication privée, fort intéressante d'ailleurs, mais un peu sujette à caution, puisqu'elle est rédigée sur les indications fournies par les Compagnies, c'est le manuel de M. Poor (*Poor's Manual*). Si nous le consultons, à défaut de mieux, nous trouvons en 1885, sur les 201.370 kilomètres de chemins de fer exploités, 1.837 voyageurs tués ou blessés par suite d'accidents de trains. Le nombre des voyageurs transportés, multiplié par les parcours effectués par eux, en d'autres termes, le chiffre total des voyageurs kilométriques a été de 15 milliards 600 millions; ce qui donne un voyageur tué ou blessé sur 8 millions 1/2 de voyageurs kilométriques transportés.

Le même chiffre sur le réseau P.-L.-M. résultant de la moyenne de 7 années de statistique officielle, publiée par les soins du ministère des travaux publics, est de 36 millions. Nous tuons ou blessons donc quatre fois et demie moins de monde qu'aux États-Unis.

Quand les aimables et obligeants compagnons de route que les administrations des chemins de fer américains nous avaient donnés, et de qui je tiens les renseignements qu'on vient de lire, s'étonnaient de mon peu d'enthousiasme, c'est par ces chiffres que j'ai répondu.

Paris, le 21 janvier 1887.

N° 55

NOTE
SUR LE TRACÉ DES PARABOLES
DES MOMENTS FLÉCHISSANTS

Par M. S. BOSRAMIER,
Conducteur principal des Ponts et Chaussées.

Le polygone curviligne enveloppe des moments fléchissants d'une poutre droite à plusieurs travées solidaires, s'obtient généralement de deux manières différentes :

1° En cherchant les équations des paraboles correspondantes à chaque hypothèse de la surcharge et traçant complètement ces courbes dans chaque travée;

2° En divisant chaque travée en tronçons particuliers et déterminant pour chacun d'eux la parabole enveloppe des moments.

Le tracé par points de toutes ces paraboles est une opération simple, mais d'une longueur fastidieuse : on l'abrège singulièrement par le procédé que nous allons indiquer ci-après.

Remarquons d'abord que, quelle que soit celle des deux méthodes rappelées ci-dessus qu'on emploie, trois points de chaque parabole sont nécessairement déterminés par le calcul. Ce sont, pour la première, les points où la courbe coupe l'horizontale et les deux verticales des appuis; pour la deuxième, les deux sommets consécutifs du polygone curviligne enveloppe des moments et le point où la verticale d'un des appuis est coupée par la para-

bole, point que l'équation de la courbe donne généralement sans calcul.

Cela posé, soient *a* et *b* (*fig.* 1) deux sommets consé-

Fig 1

cutifs du polygone curviligne enveloppe des moments, *c* le point où la parabole passant par *a* et *b* coupe la verticale de l'appui A; construisons le triangle *abc*, et, par le milieu *d* du côté *ab*, menons la verticale *ds*, qui sera le diamètre des cordes parallèles à *ab*, puisque les axes des diverses paraboles sont verticaux. Nous démontrerons plus loin que *les deux autres côtés* ac *et* bc, *du triangle* abc, *interceptent sur le diamètre* ds *un segment* mn *dont le milieu* o *est un point de la parabole.*

Le point *o*, milieu de *mn*, étant sur le diamètre *ds*, on aura les tangentes en *o*, *a* et *b* en menant *ot* parallèle à *ab*, et joignant les points *a* et *b* au point *q*, tel que *oq* = *od*. Ces trois tangentes suffiront généralement pour le tracé de l'arc *aob;* mais si d'autres points étaient nécessaires, rien ne serait plus facile maintenant que de les obtenir.

Supposons, en second lieu, qu'on ait à faire le tracé de la parabole dans toute l'étendue de la travée AB. Soient *c*, *a* et *b* les points où la parabole coupe l'hori-

zontale et les deux verticales des appuis ; formons le triangle *abc* et répétons sur le côté *ab* la construction précédente. Le point *o*, milieu de *mn*, étant sur la parabole, si on prend $oq = od$, les tangentes en *a* et *b* seront *aq* et *bq*.

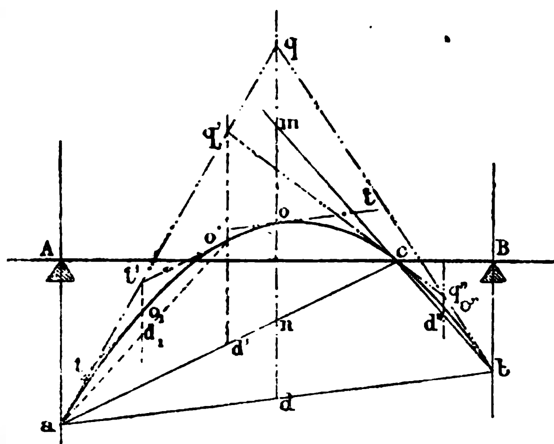


Fig. 2.

Ces tangentes coupent respectivement en q' et q'' les verticales des milieux d' et d'' des côtés *ac* et *bc*. Les points o', milieu de $q'd'$ et o'', milieu de $q''d''$, seront évidemment de nouveaux points de la courbe. $q'cq''$ est la tangente en *c ;* quant aux tangentes en *o*, o' et o'', elles sont respectivement parallèles aux côtés *ab*, *ac* et *bc* du triangle *abc*, et l'on a six tangentes pour tracer l'arc de parabole. Si quelques parties de la courbe, telles que ao', ne paraissaient pas suffisamment déterminées par les tangentes et les six points connus, on ajouterait de nouveaux points o_1 et de nouvelles tangentes o_1t_1, par le procédé ordinaire, comme on le voit sur la *fig.* 2.

Pour justifier la construction indiquée ci-dessus, soient *a*, *b*, *c* trois points d'une parabole, *o*X le diamètre des

cordes parallèles à ab. L'équation de la courbe rapportée à ce diamètre et à la tangente en o, sera de la forme

$$y^2 = 2px.$$

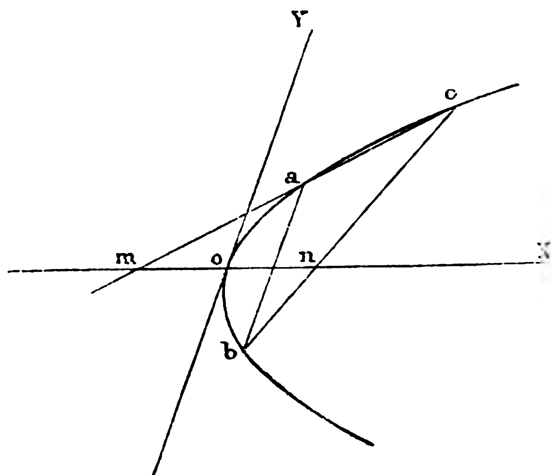


Fig. 3.

Les coordonnées des points a, b, c étant respectivement (x', y'), $(x', -y')$, (x'', y''), les droites ac et ab auront pour équations

$$(ac) \qquad y - y' = \frac{y'' - y'}{x'' - x'}(x - x'),$$

$$(bc) \qquad y + y' = \frac{y'' + y'}{x'' - x'}(x - x').$$

Ces droites coupent l'axe des x en des points m et n qui ont pour abscisses

$$om = -\frac{y'(x'' - x')}{y'' - y'} + x' = -\frac{y'(y''^2 - y'^2)}{2p(y'' - y')} + \frac{y'^2}{2p} = -\frac{y''y'}{2p},$$

$$on = \frac{y'(x'' - x')}{y'' + y'} + x' = \frac{y'(y''^2 - y'^2)}{2p(y'' + y')} + \frac{y'^2}{2p} = +\frac{y''y'}{2p},$$

donc le point o de la parabole divise en deux parties égales le segment mn du diamètre oX.

Paris, le 7 juin 1887.

CHRONIQUE

(Septembre 1887)

N° 56

Des conditions de résistance imposées aux aciers doux employés dans la construction des ponts.

Par M. de Préaudeau, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Les chiffres suivants, relatifs à l'emploi de l'acier dans les ponts métalliques actuellement en construction en France, peuvent servir de complément utile à l'article de fond inséré par M. Flamant dans les *Annales* (mai 1886, p. 665).

Le devis du pont en arc en construction sur la Seine, à Rouen, entrepris par la Compagnie Fives-Lille, exige que les aciers employés remplissent les conditions suivantes :

Résistance à la rupture.	50 kilogr.
Limite d'élasticité	22 —
Allongement avant rupture, mesuré sur une longueur prismatique de $0^m,20$	18 p. 100

Il résulte des renseignements qu'a bien voulu nous adresser M. l'Ingénieur en Chef Mengin-Lecreulx, que la moyenne des épreuves faites jusqu'à ce jour a donné des résistances à la rupture de 52 à 54 kilogr. avec 19 à 21 p. 100 d'allongement. Les allongements ont atteint jusqu'à 27 p. 100 et les résistances jusqu'à 57 kilogr.

Pour les ponts à poutres droites de la ligne de Tours à Sargé, entrepris par le Creuzot, on a demandé :

Résistance à la rupture (moyenne) 44 kilogr. avec tolérance de 4 kilogr. en plus ou en moins, ce qui peut s'écrire. . .	44 ± 4 kilogr
Limite d'élasticité	24 kilogr.
Allongement avant rupture, mesuré sur une longueur prismatique de $0^m,10$.	24 p. 100

Quant aux ponts en arc Morand et Lafayette qui vont être construits à Lyon par les Compagnies du Creuzot et de Fives-Lille, les aciers doivent donner :

Résistance à la rupture	47 ± 3 kilogr.
Limite d'élasticité	24 kilogr.
Allongement avant rupture, mesuré sur une longueur prismatique de 0m,10	24 p. 100

Le coefficient de résistance, correspondant aux aciers ainsi définis, a été :

Pour le pont de Rouen	9 kilogr.
Pour ceux de la ligne de Tours à Sargé	10 —
Pour les ponts Morand et Lafayette	»

Enfin, une importante maison de construction impose à ses fournisseurs d'aciers doux, désignés également sous le nom de *fers homogènes*, les conditions suivantes :

Résistance à la rupture (minimum)	42 kilogr.
Limite d'élasticité	30 —
Allongement avant rupture, mesuré sur une longueur prismatique de 0m,20	20 p. 100
Minimum de striction	45 —

(La striction étant le rapport de la contraction de la section rompue à la section primitive, c'est-à-dire $\left(\frac{S-s}{S}\right)$, et la somme des chiffres donnant la résistance à la rupture et la striction devant être au moins égale à 90.)

Le poids du mètre cube des aciers employés dans ces divers ouvrages est ordinairement évalué de 7.830 à 7.850 kilogr.

Paris, le 27 juillet 1887.

Mâture de 80 tonnes établie à Saint-Nazaire par la Société des ateliers et chantiers de la Loire.

(Note préparée par M. l'Ingénieur ordinaire Préverez et revue par M. l'Ingénieur en Chef Kerviler.)

La Société des *ateliers et chantiers de la Loire* vient d'établir à Saint-Nazaire, sur le quai de Méans (bassin de Penhouët), u appareil à mâter, de la force de 80 chevaux, destiné à facilit l'armement des navires que cette Société construit sur ses chantiers de Saint-Nazaire. Cet appareil présente plusieurs particula-

rités nouvelles qui nous engagent à en faire ici la description : l'inclinaison de la vis sur laquelle se meut le pied d'arrière, et la disposition de la chaîne de traction sont, en effet, employées pour la première fois d'une manière très rationnelle, destinée à donner beaucoup plus d'amplitude de manœuvre à l'engin.

Il existait déjà, au port de Saint-Nazaire, deux appareils à trépied oscillant : l'un de la force de 40 tonnes, appartenant à la marine militaire ; l'autre de force de 80 tonnes, appartenant à la Compagnie générale transatlantique. Ces deux mâtures, construites par MM. Bon et Lustremant, sont établies de manière à obtenir le déplacement du pied d'arrière à l'aide d'une *vis horizontale.* Leur hauteur est insuffisante pour permettre la mise en place des mâts un peu élevés et leur portée n'est pas assez grande pour qu'on puisse faire passer, des chalands dans les navires, sans déplacer les uns et les autres, les chaudières ou les pièces de machines amenées par eau sous les appareils de levage. Ces deux inconvénients ont été corrigés dans la nouvelle bigue.

La Société des *ateliers et chantiers de la Loire* fait construire, dans ses ateliers de Nantes, les chaudières et les machines destinées aux navires lancés à Saint-Nazaire et les expédie par gabares à Saint-Nazaire. La nouvelle mâture devait donc avoir comme portée, au moins la largeur d'un chaland augmentée de la demi-largeur d'un navire, soit environ 14 mètres. On lui a donné comme portée 14^{m},50. En déplaçant le chaland, après le levage d'un colis à une hauteur supérieure aux plats-bords des navires à armer, on peut arriver à mettre facilement en place les chaudières et machines des plus larges bâtiments connus. D'autre part, la hauteur du croc de caliorne, qui est de 25 mètres au-dessus des tourillons des bigues, est suffisante pour le mâtage des navires hauts sur l'eau que les ateliers et chantiers de la Loire peuvent avoir à construire.

Le mouvement de bascule des bigues de la nouvelle mâture est obtenu au moyen de deux vis inclinées à 45 degrés environ (voir p. 410 *bis*), sur lesquelles se meuvent les écrous de commande du pied moteur. Les avantages de cette disposition sur celle de la mâture à vis horizontale sont les suivants :

1° Réduction de la longueur à donner en plan à l'appareil ; dans le cas qui nous occupe, la longueur disponible sur le terre-plein du quai de Méans était limitée par les voies ferrées du bassin de Penhouët et la route départementale de Nantes au Croisic.

2° Action plus directe du mouvement des vis pour produire le recul ou l'avancement du troisième pied, et, par suite, le mouvement de bascule de l'appareil. La direction du troisième pied fait, en effet, avec l'axe des vis un angle variant de 0 à 20 degrés environ, tandis qu'avec les vis horizontales cet angle varie de 40 à 50 degrés environ.

3° Comme conséquence, réduction de la longueur des vis pour produire une même amplitude de bascule.

4° Usure régulière des filets des écrous; l'effort se fait, en effet, à peu près toujours sentir dans le sens de l'axe des vis; dans les appareils à vis horizontale, au contraire, l'effort est oblique, par rapport à la vis, et c'est surtout la partie inférieure de l'écrou qui travaille et qui s'use.

5° Enfin suppression des supports culbutants qui sont indispensables pour empêcher les vis horizontales de se rompre, tout en permettant à l'écrou mobile de parcourir toute la longueur de la vis. Ces supports culbutants, qui ne fonctionnent pas toujours d'une manière régulière, sont cause de nombreuses avaries pour les machines motrices des mâtures oscillantes.

Le mouvement de levage est obtenu au moyen de deux caliornes à six brins, et de deux tambours parallèles à gorge, commandés par des vis sans fins. La chaîne, après avoir passé en garant dans les caliornes, descend sur les deux tambours (*dont les gorges sont circulaires* et non hélicoïdales) en passant de l'un à l'autre et descend ensuite *dans un puits à chaînes*. En procédant de la sorte, on ne fait enrouler sur l'ensemble des deux tambours que la longueur de chaîne nécessaire à produire le frottement de la chaîne sur les tambours; on peut, par suite, faire passer, sur des tambours de dimensions restreintes, une longueur de chaîne aussi grande qu'on veut. Dans les deux autres mâtures du port de Saint-Nazaire, au contraire, la chaîne de caliorne s'enroule sur un tambour unique à gorge hélicoïdale, sur lequel elle est fixée par son extrémité, et le mouvement est arrêté lorsqu'elle est rendue à l'extrémité de la gorge. Le levage de ces appareils est, en conséquence, assez faible quoique les tambours aient une assez grande longueur et un très fort diamètre. Le mouvement de levage de la mâture des ateliers et chantiers de la Loire n'est limité que par la hauteur de l'appareil lui-même, lorsque la caliorne mobile vient rencontrer la caliorne fixe.

Une machine horizontale de la force de 25 chevaux fait, au moyen de transmission par courroies, mouvoir, soit séparément, soit simultanément, l'écrou du pied arrière et les tambours d'en-

roulement. Elle peut, en outre, actionner un treuil secondaire placé en avant des supports des vis inclinées, et dont les poupées servent au levage de fardeaux dont le poids n'est pas assez fort pour exiger l'emploi des caliornes à chaînes.

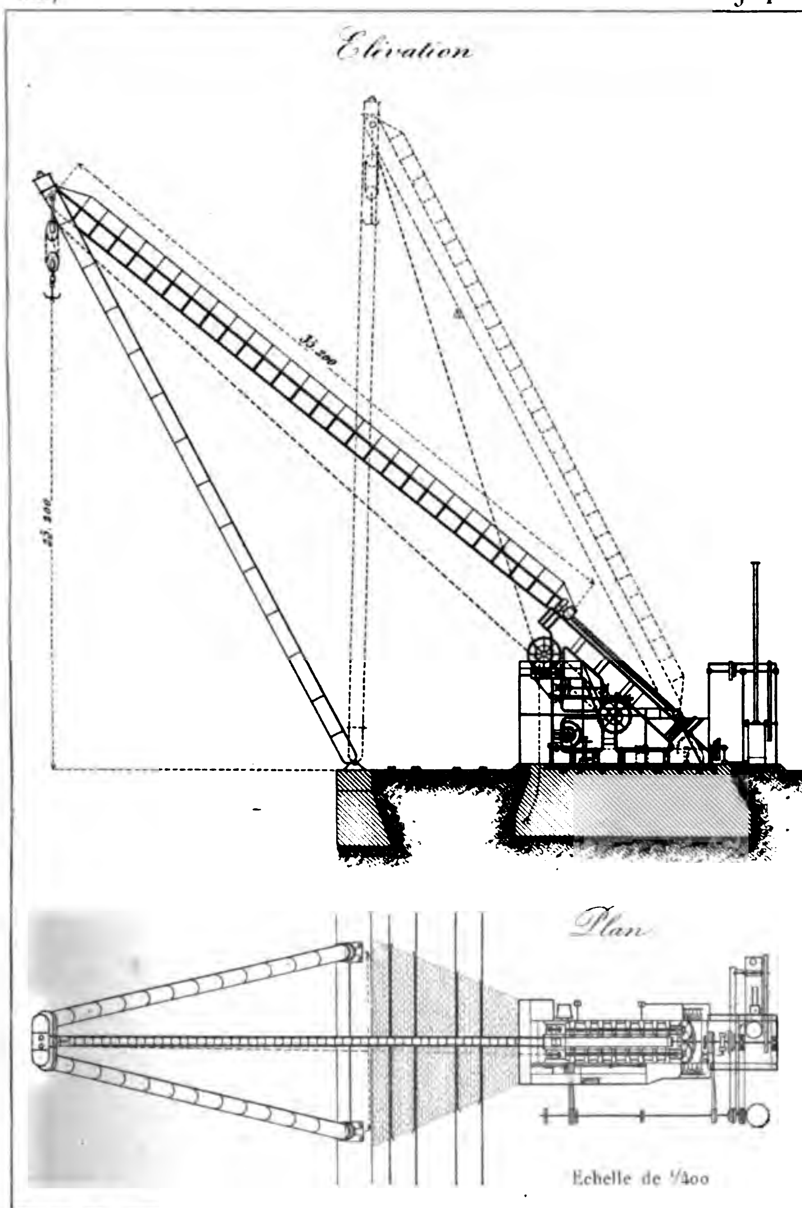
Deux voies ferrées passent entre les pieds de la mâture. L'appareil peut ainsi prendre charge soit sur chalands, soit sur wagons.

Les fondations de cette mâture présentent cette particularité que, conformément au système adopté par nous en 1881 pour les substructions des grands ateliers de la Loire au milieu des vasières de Penhouët, elles reposent directement sur un sol de vase, terre et pierrailles jetées au wagon lors de l'exécution des remblais du bassin de Penhouët. On n'a point battu de pieux de fondation ; mais pour éviter tout tassement ou tout déversement de l'ensemble, on a donné au massif de base une surface telle que la pression maximum par centimètre carré, à pleine charge, *soit inférieure à* 800 *grammes*, ce qui correspond à 8 tonnes par mètre carré. Dans ces conditions, le remblai du terre-plein supporte sans s'affaisser le poids considérable de la mâture, des appareils de manœuvres, du bâtiment qui couvre les machines, du massif de fondation et des 80 tonnes suspendues aux caliornes.

Le tableau ci-après donne un certain nombre de renseignements sur les vitesses obtenues et les efforts produits dans les différents mouvements de l'appareil et de ses accessoires.

	VITESSE		
	Petite	Moyenne	Grande
1° Machines et transmissions spéciales.			
Nombre de tours de la machine motrice par minute.	107	107	107
Puissance sur l'arbre.	25ch	25ch	25ch
Nombre de tours de la 1re transmission par minute.	158	158	158
— de la 2e — —	102	158	213
— des arbres portant les poulies à débrayage.	105	163	250
2° Mouvement de levage.			
Nombre de tours des arbres à vis sans fin par minute.	67,7	105,1	161,1
— — des tambours —	1,05	1,64	2,51
Vitesses d'enroulement de la chaîne sur les tambours par seconde	0,052	0,082	0,126
Vitesses de levage de la charge par seconde	0,0088	0,0136	0,0209
Puissances de levage maximum correspondantes à ces vitesses.	80.000kg	51.500kg	33.600kg
3° Mouvement de translation.			
Nombre de tours de l'arbre de la roue d'angle par minute	23,1	35,8	55,0
Nombre de tours des vis de translation par minute.	7,5	11,6	17,8
Vitesses de translation du pied A par seconde.	0m,0035	0m,0054	0m,0083
— — horizontale de la charge par seconde	0 ,0073	0 ,0113	0 ,0173
Puissances de translation maximum correspondantes à ces vitesses	80.000kg	51.500kg	33.600kg
4° Mouvement des poupées du treuil secondaire.			
Nombre de tours de l'arbre à vis sans fin par minute.	105	163	250
— — des poupées —	2,28	3,53	5,42
Vitesses à la circonférence des poupées par seconde.	0,089	0,138	0,211
Puissances de traction maximum correspondantes à ces vitesses	11.000kg	7.100kg	4.600kg

Saint-Nazaire, ce 13 juillet 1887.


Elevation
33.200
25.200
Plan
Echelle de 1/400

N° 57

PORT DU HAVRE

MÉMOIRE

SUR LES NOUVELLES PORTES EN TOLE

DE L'ÉCLUSE DES TRANSATLANTIQUES

Par MM. ÉDOUARD WIDMER, Ingénieur en chef des ponts et chaussées
et HENRY DESPREZ, Ingénieur des ponts et chaussées.

EXPOSÉ.

L'écluse des Transatlantiques, qui met en communication l'avant-port avec le bassin de l'Eure, au port du Havre, a $30^m,50$ de largeur. Le busc en pierres de taille de granit présente une flèche de $5^m,51$ et est arasé à $2^m,85$ en contre-bas du zéro des cartes (Pl. 36, *fig.* 1, 2, 3 et 4). L'écluse était, jusqu'à ces derniers temps, munie de deux paires de portes d'èbe en bois construites en 1861-1862. Ces portes avaient $17^m,50$ de longueur sur $9^m,80$ de hauteur (non compris la passerelle qui les surmontait). Les poteaux tourillon et busqué qui étaient en chêne avaient chacun $0^m,88$ d'équarrissage; ils étaient formés de plusieurs pièces de bois qu'on avait cherché à rendre aussi solidaires que possible. Les entretoises étaient en sapin rouge, elles étaient également

formées de plusieurs pièces assemblées entre elles ; leur largeur variait de $0^m,88$ aux extrémités à $2^m,08$ au milieu. Elles étaient réunies en trois cours d'inégale importance. Le premier régnait depuis le bas du vantail sur une hauteur de $5^m,40$. La porte était donc massive sur toute cette hauteur.

Le second cours était placé au-dessus de l'espace libre réservé pour les vannes ; il avait $0^m,90$ de hauteur. Le troisième enfin était formé par l'entretoise supérieure qui n'avait que $0^m,60$ d'épaisseur. Le cube total de la charpente d'un vantail était de 500 mètres cubes environ ; le poids des ferrures et métaux de toute nature qui étaient entrés dans la construction atteignait 135.000 kilogr., et le prix d'une paire de portes s'était élevé à 415.000 francs, y compris la mise en place et les dépenses en régie.

Depuis deux à trois ans, les deux paires de portes, et notamment celle d'aval qui est la plus exposée au choc de la houle, présentaient des symptômes de dislocation fort inquiétants. Le poteau busqué du vantail sud d'aval avait tassé de près de 6 centimètres et était fendu sur une partie de sa hauteur ; le poteau tourillon sonnait creux sous le marteau en certains points ; l'entretoise supérieure, primitivement plane vers l'aval, avait pris de ce côté un bombement dont la flèche atteignait 14 centimètres. Des fuites importantes avaient lieu à travers le bordé des quatre vantaux. La plus simple prudence exigerait donc la construction de portes neuves à bref délai.

CONVENANCE D'EXÉCUTER EN TÔLE LES NOUVELLES PORTES.

Au moment de dresser le projet de ces portes nous avons cru devoir, dès l'abord, écarter l'emploi du bois.

Le chêne du pays devenant de plus en plus rare, il aurait fallu de toute nécessité recourir aux bois d'Amérique. Le marché du Havre est généralement, à la vérité, assez bien pourvu de certaines essences de ces bois, lorsqu'on n'a besoin que de poutres de dimensions courantes, mais pour des pièces de la longueur et de l'équarrissage nécessaires pour les portes dont il s'agit, une commande spéciale dans le pays de provenance aurait été indispensable. Or, certains de ces bois contiennent des défauts que l'on n'aperçoit qu'au moment de la mise en œuvre. On pouvait donc être amené, ou à admettre une pièce défectueuse dont la présence altère toujours plus ou moins la solidité de l'ensemble de l'ouvrage, ou à arrêter la construction jusqu'à ce que cette pièce ait pu être remplacée par une autre à faire venir d'au delà de l'Océan. En construisant les nouvelles portes en bois, on était ainsi exposé à se trouver à un moment donné dans un cruel embarras.

Une construction en tôle ne présente à aucun degré cet inconvénient. Les usines qui travaillent le fer sont assez nombreuses, en France, pour qu'il soit facile de remplacer en quelques jours des tôles reconnues défectueuses. L'adoption de la tôle conduit, d'autre part, à une économie notable qui, pour les portes de grandes dimensions comme celles de l'écluse des Transatlantiques, atteint 30 pour 100. Ces motifs, et sans doute l'espoir d'une plus grande durée, ont fait admettre, depuis une quinzaine d'années, l'emploi de la tôle pour la construction d'un assez grand nombre de portes d'écluses dans plusieurs de nos ports. C'est ainsi qu'il en existe aujourd'hui à Dunkerque, à Boulogne, à Saint-Nazaire, à Bordeaux, au canal Saint-Louis. L'exemple de Boulogne est particulièrement probant. Des deux paires de portes (construites en 1866 et 1867) pour le sas qui donne accès au bassin à flot de ce port, l'une a été exécutée en bois, l'autre en

tôle. Bien que ces dernières se trouvent à l'aval et soient par conséquent plus exposées que les autres, elles sont d'un entretien facile, se maintiennent très bien, tandis que les portes en bois sont déjà en très médiocre état. Il est aisé, d'autre part, d'aménager des portes en tôle de façon à pouvoir les faire flotter sans adjonction de barriques ou d'autres moyens artificiels. On facilite ainsi, dans une large mesure, le décrochage et la mise en place des vantaux. On pourra donc, sans grande peine, en profitant de ce que l'écluse est munie de deux paires de portes d'èbe, décrocher tous les deux ou trois ans les vantaux en tôle, les conduire dans une des formes sèches, les y gratter, les nettoyer et au besoin les y réparer.

Une seule considération nous a fait hésiter toutefois pendant un moment à employer le fer; c'est le fait que les crapaudines femelles qui existent dans le radier et dans lesquelles tournent les portes actuelles, sont en bronze. Eu égard à la position de ces crapaudines qui, par les plus basses mers, sont couvertes de 4 mètres d'eau et qui se trouvent à l'angle même du chardonnet, il n'y avait pas à songer à les enlever pour les remplacer par d'autres en acier. Or l'on sait que, d'une façon générale, il convient d'éviter, à la mer, de juxtaposer deux métaux de nature différente à cause des courants galvaniques qui se développent à leur contact. Mais il est maintenant reconnu que le bronze agit beaucoup moins sur le fer que le cuivre rouge et que cette action n'est pas appréciable lorsque la masse ou la surface du bronze est très petite comparativement à celle du fer. C'est ainsi que les arbres en fer qui portent les hélices des bâtiments de la Compagnie générale transatlantique tournent sans aucun revêtement dans les deux manchons en bronze qui les soutiennent au portage du presse-étoupe et à celui du coussinet arrière. De même, les manchons recevant les robinets du tuyautage d'extraction de l'eau des chau-

dières, qui se faisaient autrefois en fonte, se font maintenant en bronze. Les boulons, qui assemblent ces manchons avec le bordé extérieur, se fixent même sur une collerette extérieure également en bronze. Le bordé en tôle se trouve ainsi pris entre deux pièces en bronze sans que l'on constate de détérioration. Si l'on observe qu'en vertu des lois qui régissent les forces électromotrices, le fer ne peut attaquer le cuivre, dont la force électromotrice est moindre que la sienne, on reconnaîtra que l'on peut, sans inconvénient, faire tourner des portes en tôle munies d'un pivot en acier dans la crapaudine femelle en bronze qui existe dans le radier. Les mouvements sont d'ailleurs si lents et si peu fréquents (quatre fois par vingt-quatre heures) qu'il ne nous a même pas paru utile, au point de vue de l'usure qui peut résulter du frottement, de munir le pivot en acier au portage dans la crapaudine d'une douille en bronze.

CHOIX DU TYPE A ADOPTER.

La plupart des portes métalliques qui existent dans les ports ont leur ossature formée à l'instar des portes en bois, d'entretoises horizontales contreventées par un petit nombre de pièces verticales, dont les deux extrêmes constituent les poteaux tourillon et busqué. Dès 1863, M. l'ingénieur en chef Collignon, alors ingénieur à Lorient, avait proposé pour l'écluse de 16 mètres qui donne accès au bassin du commerce de ce port de construire des portes en tôle dans lesquelles le cadre formé par les entretoises supérieure et inférieure et les poteaux tourillon et busqué serait rempli par des montants verticaux analogues aux aiguilles d'un barrage. Ce projet ne fut pas exécuté, l'Administration supérieure ayant pensé que les constructions métalliques à la mer, n'avaient pas encore, à l'époque, reçu une

sanction suffisante de l'expérience. Mais tout dernièrement trois paires de portes conçues d'après le même type ont été projetées et exécutées par M. l'ingénieur Guillain, pour l'écluse à sas du bassin de l'Ouest, à Dunkerque; elles sont en service depuis plus de trois ans et se comportent d'une façon très satisfaisante.

Cette disposition nouvelle présente sur l'ancienne les avantages suivants :

1° L'appareil à aiguilles verticales est bien plus simple à calculer et cette circonstance, bien qu'elle semble au premier abord n'intéresser que le rédacteur du projet, entraine une économie réelle dans la construction. On peut, en effet, dans le cas où le calcul s'applique avec précision, déterminer rigoureusement les dimensions utiles, tandis que dans les problèmes obscurs où l'arbitraire vient en fin de compte suppléer à l'insuffisance des méthodes, il faut toujours pécher par excès pour être sûr des résultats (*).

2° Les aiguilles verticales, lorsque la porte est fermée, répartissent la pression de l'eau d'une façon bien plus favorable. Le busc, en effet, supporte dans cette disposition une portion beaucoup plus élevée et, dans certains cas, jusqu'aux deux tiers de la pression totale. Ce fait résulte des expériences de M. Chevallier. On sait, en effet, que l'une des conclusions du mémoire de cet éminent ingénieur (*Annales* de 1850, p. 306) est que pour la même raideur relative d'entretoise et de bordage, lorsqu'on di-

(*) M. l'Ingénieur Lavoinne a bien fait paraître, dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1865, un exposé de calculs des portes à entretoises horizontales. Sa notice se termine par des formules réduites en tables qu'il peut être commode d'appliquer dans certains cas. Mais ces formules supposent que la largeur des entretoises, dans le sens normal au busc, est constante ou tout au moins qu'elle ne varie pas de l'extrémité vers le milieu plus rapidement que l'indique une loi déterminée. Dans les cas analogues au nôtre où l'on est obligé par suite de la disposition des maçonneries d'admettre une variation plus rapide, on est conduit à des raisonnements qui n'ont rien de rigoureux.

minue le nombre des entretoises, la pression sur le seuil augmente, et par suite la somme des pressions sur l'entretoise la plus chargée, si on la rapporte à la pression moyenne, diminue.

3° Dans notre espèce, la hauteur de la porte n'étant que de $10^{m},60$, tandis que sa longueur atteint $17^{m},50$, on peut, avec la même hauteur d'âme, c'est-à-dire avec la même largeur du vantail mesurée perpendiculairement au busc, donner beaucoup plus de raideur au système. On sait, en effet, qu'à charge égale, le rapport de la flèche d'une pièce à sa portée est inversement proportionnel au cube du rapport de la hauteur à la portée (*).

4° Les entretoises horizontales des portes ne pouvant être distantes de plus de $0^{m},90$ à 1 mètre, ce système de construction rend très difficile la visite des compartiments intérieurs; avec des montants verticaux, au contraire, on peut aisément circuler et travailler dans l'intérieur du vantail, condition indispensable pour que le renouvellement des peintures soit soigneusement exécuté.

Telles sont les considérations qui nous ont fait adopter,

(**) La flèche f prise par une poutre sous l'action d'une force également répartie pa est donnée par les formules :

$$f = \frac{pa \times a^3}{\mathrm{EI}} \times \frac{5}{384} \quad \text{ou} \quad f = \frac{pa \times a^3}{\mathrm{EI}} \times \frac{1}{384},$$

suivant qu'elle est simplement posée ou encastrée à ses deux extrémités. La valeur de $\frac{f}{pa}$ est donc proportionnelle au rapport $\frac{a^3}{\mathrm{EI}}$. Or I est proportionnelle au produit b^3c, b désignant la dimension de la section parallèle et c la dimension de la section perpendiculaire à la direction de la charge; $\frac{f}{a}$ est donc proportionnel à $\frac{a^3}{\mathrm{E}b^3c}$, et si E et c restent les mêmes à $\frac{a^3}{b^3}$ ou inversement proportionnelle à $\left(\frac{b}{a}\right)^3$.

De là l'utilité qu'il y a à augmenter la hauteur de la poutre, proportionnellement à sa portée.

à l'exemple de M. Guillain, l'appareil à aiguilles verticales.

Nous avons conservé les dispositions appliquées par cet ingénieur aux trois paires de portes de la nouvelle écluse à sas de Dunkerque ; les modifications que nous avons introduites ont été motivées par les dimensions plus considérables des portes que nous avions à construire.

DESCRIPTION D'UN VANTAIL.

L'ossature d'un vantail comprend (Pl. 37, *fig.* 1 et 2) :

1° Un cadre constitué par une traverse supérieure, une traverse inférieure, une poutre tubulaire formant poteau tourillon, et une autre poutre tubulaire formant poteau busqué ;

2° Neuf montants verticaux partageant en dix intervalles égaux la distance horizontale entre le poteau tourillon et le poteau busqué ;

3° Deux cloisons ou entretoises horizontales intermédiaires entre les traverses inférieure et supérieure ;

4° Des membrures horizontales inégalement espacées et destinées à raidir le bordage, lequel couvre les deux faces de la porte.

L'espace compris entre la traverse inférieure et la première entretoise intermédiaire à compter du bas, d'une part, le septième montant vertical à compter du poteau tourillon inclusivement, d'autre part, constituent une série de chambres à eau étanches. Tout le reste de l'espace compris entre la traverse inférieure et la deuxième entretoise intermédiaire, à compter du bas, forme avec le poteau busqué des chambres à air également étanches. Au-dessus de la deuxième entretoise intermédiaire, la mer pénètre librement à l'intérieur de la porte, dans la partie comprise entre les poteaux tourillon et busqué au

moyen d'ouvertures ménagées dans le bord d'amont et munie de vannes. Des bondes de fond munies de clapets et de tuyaux recourbés sont placés dans l'âme de l'entretoise de façon à permettre de vider à mer basse du côté d'aval le compartiment supérieur de la porte. Les vannes et les bondes de fond peuvent être manœuvrées du sommet de la porte.

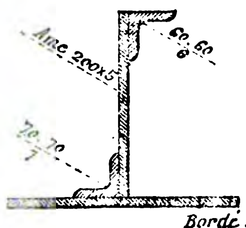
On obtient de la sorte un vantail qui peut présenter un poids effectif suffisant pour ne pas être soulevé par une lame, ou par le choc d'un navire, tout en ayant, par rapport à l'axe de rotation, un moment relativement faible, condition très favorable au point de vue du travail des attaches. La deuxième entretoise intermédiaire à compter du bas étant d'ailleurs placée au-dessous du niveau le plus bas auquel les portes sont manœuvrées, le déplacement du vantail correspondant aux différents niveaux de la pleine mer ne diffère que d'une quantité égale au volume des fers entrant dans la construction de la partie supérieure de la porte augmenté du volume des parties supérieures des poteaux tourillon et busqué. Des trous d'hommes sont ménagés dans les faces d'amont des poteaux tourillon et busqué dans les faces latérales de ces poteaux, et dans les montants verticaux de façon à permettre d'accéder et de circuler librement dans les caisses à air et à eau, ainsi que dans la zone supérieure de la porte. Ces trous sont susceptibles d'être fermées hermétiquement au moyen de bouchons d'acier fondu à charnières.

Des fourrures en bois de chêne mailleté sont placées suivant les deux côtés verticaux et suivant le côté horizontal inférieur du vantail, pour assurer l'étanchéité du système au contact des deux poteaux busqués, ainsi qu'au contact de chaque vantail avec le chardonnet correspondant et avec le busc.

Les portes mises en chambre ont leur face antérieure

à $0^m,58$, en arrière du plan des bajoyers; cependant, par mesure de précaution, quatre défenses horizontales, également en chêne, sont disposées sur cette face pour protéger la porte contre le frottement des navires à leur passage dans l'écluse. Les fourrures et les défenses sont d'ailleurs fixées sur le vantail de telle façon qu'aucun boulon ne traverse les parois des compartiments qui doivent être étanches.

Membrures. — Les membrures horizontales présentent uniformément la forme d'un fer en Z composé d'une âme de $0^m,200$ de large de $0^m,005$ d'épaisseur et de deux cornières de $\frac{60.60}{6}$ et de $\frac{70.70}{7}$. Elles sont fixées à leurs extrémités sur les âmes des montants verticaux au moyen de cornières de $\frac{80.80}{8}$.



Montants verticaux. — Les montants verticaux sont formés d'une âme en tôle de $1^m,500$ et de 0,010 d'épaisseur de quatre cornières de $\frac{90.90}{12}$, et enfin de deux semelles de 0,012 d'épaisseur sur chaque rive. La première règne sur toute la hauteur et a une largeur de $0^m,340$ de façon à présenter, de chaque côté du montant en dehors des cornières, une bande en saillie de $0^m,065$, sur laquelle se rive intérieurement la tôle du bordage. La deuxième semelle a $0^m,210$ de largeur et règne sur une hauteur de $6^m,315$, en commençant à $1^m,44$, au-dessus de l'âme de la traverse inférieure. Les âmes des montants sont raidies de distance en distance par des cornières horizontales.

Poteaux tourillon et busqué. — Les parois latérales des poteaux tourillon et busqué sont constituées par des pièces analogues aux montants. L'âme de ces parois a $0^m,015$ d'épaisseur; elles sont assemblées à l'aide de cornières de $\frac{100.100}{12}$, avec deux semelles de 14 et 15 millimètres qui ont respectivement $0^m,340$ et $0^m,210$ de largeur et qui règnent sur toute la hauteur de la porte. Des panneaux écartés de $0^m,45$ les uns des autres raidissent intérieurement les tôles des quatre faces des poteaux et rendent invariable la forme de leurs sections.

Traverse inférieure (Pl. 38, *fig.* 3 et 4). — La traverse inférieure a été disposée de façon à permettre un assemblage très solide avec les montants verticaux. Elle comprend une âme de $0^m,015$ d'épaisseur, quatre cornières de $\frac{90.90}{10}$, deux semelles sur chaque rive ayant chacune $0^m,50$ de hauteur et $0^m,12$ d'épaisseur. L'âme de la traverse est raidie dans l'intervalle des montants verticaux, d'une part, par des varangues perpendiculaires au busc rivées sur la face supérieure de l'âme, au nombre de trois par chaque intervalle, d'autre part, par des goussets en tôle et cornières rivés sur la face inférieure de l'âme au droit des montants verticaux et des varangues de la face supérieure.

Entretoises intermédiaires. — Les entretoises intermédiaires sont composées d'une série de panneaux pleins en tôle de 10 millimètres d'épaisseur, assemblés avec les âmes des montants verticaux et les bordages, par des cornières de $\frac{70.70}{9}$. Les panneaux de l'entretoise intermédiaire supérieure qui ont à supporter le poids de l'eau qui s'introduira dans le compartiment où la mer doit

jouer librement sont raidis par des cornières transversales.

Traverse supérieure (Pl. 38, *fig*. 1 et 2). — La traverse supérieure est la pièce la plus chargée du système, c'est elle, en effet, qui soutient avec le busc les efforts résultant de la pression directe de l'eau et qui reçoit, en outre, pour le transmettre au chardonnet l'effort de réaction produit par l'autre vantail. La pièce a été traitée en conséquence. Elle comprend :

1° Une âme en tôle de $0^m,015$ d'épaisseur dont la rive d'aval est une ligne droite et dont la ligne d'amont comprend trois tronçons de droite réunis par deux arcs de cercle de $3^m,50$ de rayon, de manière que la largeur perpendiculaire au busc soit de $0^m,850$ seulement aux deux extrémités et de $1^m,500$ entre les premier et neuvième montants verticaux (comptés à partir du poteau tourillon), l'âme étant d'ailleurs munie à ses extrémités, sur chacune de ses faces, de tôles de renfort, qui en augmentent successivement l'épaisseur, laquelle atteint ainsi $0^m,075$ au portage sur les sabots métalliques extrêmes;

2° Deux cornières de $\frac{150 \times 150}{15}$ qui suivent la rive d'amont;

3° Deux cornières de $\frac{150 \times 150}{15}$ qui suivent la rive d'aval;

4° Des semelles d'amont de 1 mètre de hauteur placées symétriquement par rapport au milieu du vantail et dont les dimensions sont les suivantes :

1er rang. . . .	$12^{mm} \times 17^m,167$		4e rang. . .	$12^{mm},5 \times 12^m,977$
2e —	$12 \times 15,865$		5e — . . .	$12,5 \times 12,566$
3e —	$12 \times 14,482$		6e — . . .	$12,5 \times 5,980$

Ces semelles sont d'ailleurs doublées intérieuremen[t] sur toute la longueur de la poutre par des fers plats d[e]

0^m,400 et 0^m,330 de hauteur et 0^m,15 d'épaisseur placés dans le plan des ailes verticales des cornières;

5° Une semelle d'aval de 0^m,400 de hauteur et de 10 millimètres d'épaisseur faisant, au-dessus du bord de la cornière d'aval supérieure, une saillie de 0^m,080 sur laquelle se rive intérieurement le bordage d'aval. Cette semelle est doublée par une autre tôle de 15 millimètres aux abords de chacune des extrémités de la traverse, et s'élargit ainsi que sa doublure, jusqu'à atteindre au portage sur les sabots métalliques extrêmes une hauteur de 1 mètre, égale à celle des semelles d'amont.

L'âme est reliée aux semelles, non seulement par les cornières longitudinales indiquées ci-dessus et par les montants verticaux dont les cornières de rive s'attachent à la fois à l'âme et aux semelles, mais encore par de solides pièces de contreventement en tôles et cornières placées au-dessus et au-dessous de l'âme au droit des montants verticaux et au milieu de leurs intervalles, c'est-à-dire à des distances de 0^m,722 les unes des autres. Par suite de ces dispositions, la fibre neutre de la traverse prend une forme convexe vers l'amont et se trouve placée à l'amont de la ligne droite suivant laquelle agissent la réaction des vantaux et la réaction du chardonnet. Il en résulte que ces réactions, considérées isolément, tendent à courber l'entretoise vers l'amont, et détruisent ainsi en partie l'effet des pressions d'eau directes qui tendent, au contraire, à courber l'entretoise vers l'aval.

Tourillons supérieur et inférieur. — Pour transmettre aux maçonneries l'effet de la réaction des vantaux, les deux extrémités de la traverse supérieure sont armées de sabots en acier.

Le sabot du poteau tourillon est en contact avec le hardonnet, sur une surface de 1^m,20 de hauteur sur ^{m},80 de largeur, la pression transmise par l'entretoise upérieure étant de 492.170 kilogrammes, la surface de

la maçonnerie de granit n'a à subir qu'un effort de 51^{k},2 par centimètre carré, soit environ le quatorzième de la charge d'écrasement qui est de 700 kilogrammes.

Les queues des pierres de granit formant un empâtement de plus de 3^{mq},4, la pression sur la maçonnerie intérieure n'atteint pas 16^{k},2 par centimètre carré. Le chardonnet est d'ailleurs soutenu par un massif de maçonnerie qui a une épaisseur de 8 mètres comptée normalement aux bajoyers et de 12 mètres, si on la mesure suivant la direction de la réaction de la traverse supérieure sur les maçonneries, est donc faible relativement à leur capacité de résistance.

Le sabot d'acier (Pl. 39, *fig.* 1 et 2) par lequel la traverse supérieure s'appuie sur le chardonnet, porte un piton cylindrique qui constitue le pivot supérieur du vantail. Un collier en fer (Pl. 40, *fig.* 3) embrasse ce piton, et est attaché lui-même par deux bielles articulées à une ancre à trois branches solidement scellée dans les maçonneries. Les dispositions de ce collier ont été étudiées de façon que la mise en place de la porte puisse s'effectuer dans une position parallèle aux bajoyers de l'écluse.

Au pied du poteau tourillon, le vantail porte une crapaudine mâle en acier (Pl. 39, *fig.* 3, 4 et 5) qui s'engage dans la crapaudine femelle en bronze de l'ancienne porte en bois. Les formes de cette crapaudine mâle ont été arrêtées, de façon à ce que les efforts qu'elle reçoit ne soient supportés que dans une faible proportion par les boulons qui l'attachent au vantail.

En examinant les dessins d'ensemble et de détail des portes, on remarquera que toutes les tôles et cornières qui entrent dans la construction présentent les dimensions courantes du commerce. A l'exception des tôles qui raccordent la partie centrale des portes, avec les poteaux tourillon et busqué et des cornières correspon

dantes, toutes les pièces sont droites et peuvent être mise en œuvre telles qu'elles sortent du laminoir. On a évité de la sorte le travail de cintrage qui altère toujours plus ou moins la matière et qui augmente de 10 p. 100 au moins le prix du travail.

Travail du métal. — Les calculs qui forment l'annexe de la présente note justifient les dimensions des différentes parties de la construction. Il résulte de ces calculs :

1° Que, lorsque les portes sont fermées, le métal n'est en aucun point soumis à un travail supérieur à 7 kilogrammes par millimètre carré, dans le cas le plus défavorable (niveau de l'eau dans le bassin arasant le dessus de la traverse supérieure (*), niveau des plus basses mers connues dans l'avant-port).

2° Que, dans le cas le plus défavorable, où les portes peuvent avoir à être manœuvrées (niveau des plus basses mers connues dans l'avant-port), les efforts développés dans les attaches restent inférieurs par millimètre carré à 2 kilogrammes pour les pièces en fer, et à $4^{kil},69$ pour les pièces en acier, le tassement du vantail à l'extrémité correspondante au poteau busqué est en outre insignifiant, même dans ce cas exceptionnel.

Ce second résultat démontre l'inutilité des roulettes qui, pour les portes de grandes dimensions, comme celles de l'écluse des transatlantiques, sont généralement d'une manœuvre très difficile.

Étanchéité du vantail. — Ce résultat n'est obtenu toutefois que si la caisse à air qui occupe la plus grande partie du vantail est bien étanche. Aussi s'est-on attaché lors du montage définitif des portes à réaliser cette étanchéité aussi complètement que possible. Les joints des

(*) Le dessus de l'entretoise supérieure est arasé à $7^m,75$ au-dessus du zéro des cartes. Cette cote a été déterminée d'une façon uniforme pour les portes de toutes les écluses donnant sur l'avant-port du Havre.

parois ont été soigneusement matés, et comme ce matage ne suffisait pas en plus d'un point par suite d'un assemblage imparfait des tôles, on s'est astreint à rechercher les petits conduits qui livraient passage à l'eau, et à les boucher en enfonçant, dans un trou percé vers le milieu du parcours, un goujon garni de mastic au minium. Grâce à ces précautions, la porte laissée à elle-même pendant huit jours ne présente pas plus de 4 à 8 centimètres de hauteur d'eau dans ses compartiments à air des deux étages. Pour évacuer cette eau, une pompe de cale pouvant débiter 60 litres par seconde a été placée vers le milieu du vantail au-dessus de la deuxième entretoise intermédiaire à partir du bas. La conduite d'aspiration de cette pompe se compose d'un tuyau principal de $0^m,04$ de diamètre, fixé horizontalement sur l'entretoise considérée dans toute la longueur de la porte et d'une série de tuyaux de $0^m,04$ de diamètre branchés sur le premier et aboutissant à la partie inférieure de chacun des compartiments étanches de la caisse à air (Pl. 40, *fig.* 6).

Des robinets placés à la jonction des tuyaux secondaires et du tuyau principal permettent d'épuiser successivement dans les divers compartiments.

Il importait aussi de se ménager les moyens de vider et de remplir à volonté la caisse à eau.

Le remplissage s'opère au moyen de tubes qui s'élèvent jusqu'à la partie supérieure de la porte, et qui sont ordinairement fermés au moyen de bouchons métalliques. On a eu soin de juxtaposer, à chacun de ces tubes, un tuyau d'évent, pour permettre l'évacuation de l'air pendant le remplissage.

La vidange aurait pu s'effectuer à l'aide de la pompe à cale; mais elle serait ainsi fort lente. Or cette opération, qui sera généralement motivée par la nécessité d'enlever les portes, aura besoin au contraire d'être exécutée rapidement. Tout a donc été disposé de façon que l'on puisse,

le moment venu, installer dans un compartiment voisin de la pompe de cale, et au même niveau qu'elle, un pulsomètre auquel la vapeur sera fournie par une chaudière que l'on amènera, pour l'occasion, sur les bajoyers de l'écluse.

GALVANISATION DES TÔLES.

Dans le but de conserver les tôles et d'en prolonger la durée, toutes les pièces qui entrent dans la construction des portes ont été galvanisées. Cette opération s'exécute actuellement dans des conditions satisfaisantes, et plusieurs constructeurs ont monté dans leurs usines des ateliers de galvanisation. Les principales pièces de nos portes ont été galvanisées au Havre même, dans un établissement spécial bien organisé qui possède des cuves de 11 mètres de longueur.

Les rivets qui assemblent les différentes pièces entre elles, ne peuvent naturellement être galvanisés; l'expérience des constructions navales a prouvé que leurs têtes se couvrent assez rapidement d'une pellicule de zinc, aux dépens des tôles voisines. Par surcroît de précautions, les tôles ont reçu par-dessus le galvanisage, deux couches de peinture à base de zinc.

MONTAGE DES PORTES.

Les deux paires de portes dont il vient d'être question ont été construites par M. Le Brun, constructeur à Creil (Oise), auquel les tôles et cornières ont été fournies par les forges de Hautmont (*la Providence*), Montataire, Vireux-Molhain et Ivry.

Les conditions de résistance imposées par le cahier des charges pour les fers laminés, étaient de 32 kilogrammes par millimètre carré, dans le sens du laminage,

et de 30 kilogrammes dans le sens transversal. Les allongements au moment de la rupture ne devaient pas être inférieurs respectivement à 9 p. 100 et 6 p. 100. Les différents lots qui ont été soumis à notre réception ont généralement satisfait à ces conditions ; nous n'avons eu à rebuter que deux lots de faible importance.

Une tolérance a cependant dû être accordée pour les larges plats qui constituent les semelles des montants verticaux. Ces fers ont donné les résistances exigées, ainsi qu'un allongement très satisfaisant dans le sens du laminage; mais leur élasticité dans le sens transversal est extrêmement faible.

Aux termes du cahier des charges, les quatre vantaux devaient être montés provisoirement à l'atelier du constructeur. En fait, le montage de l'ossature des deux premiers vantaux a été fait complètement au moyen de broches et de boulons. Pour les deux derniers le montage des traverses inférieures et supérieures et des poteaux busqués et tourillons a été seul exigé.

Le montage définif a eu lieu au Havre sur le terreplein ouest du bassin de la Floride, qui n'est séparé de ce bassin que par un talus en plan incliné.

Les portes ont été construites à plat sur des chantiers qui les élevaient de $1^{m},20$ environ au-dessus du sol. L'opération a été longue en raison des difficultés qu'a présentées l'étanchement de différentes parties de la construction. Pour le premier vantail, elle n'a pas duré moins de six mois. Avant d'autoriser la mise à l'eau des portes, on a d'ailleurs eu soin de s'assurer de leur étanchéité en remplissant d'eau successivement leurs différentes parties. La pression de cette eau était, au moyen d'une presse à bras, élevée à une pression supérieure de moitié à la pression maxima que chacune des zones de la porte une fois mise en service peut avoir à supporter dans les conditions les plus défavorables.

MISE EN PLACE.

L'opération de la mise en place des portes était comprise dans les charges de l'entreprise; elle a été exécutée par la maison Le-Brun.

Une fois l'étanchéité d'un vantail reconnue, on procédait à sa mise à l'eau dans le bassin de la Floride, au moyen d'un ber en charpente long de 35 mètres et présentant une pente de $0^{m},14$ par mètre. Le lancement s'est toujours opéré avec facilité. Pour un seul des quatre vantaux, le graissage du ber ayant été fait trop longtemps à l'avance, il a été nécessaire d'agir sur la porte avec deux cabestans pour déterminer le glissement.

Le vantail mis à l'eau flottait à plat, le bordé aval à la partie supérieure; son poids étant d'environ 160.000 kilogrammes et son volume de 248 mètres cubes; elle émergeait d'une partie de son épaisseur. Pour effectuer l'accrochage, il fallait amener le vantail dans l'écluse, la traverse supérieure contre le bajoyer, le dresser verticalement au moyen d'engins disposés sur le bajoyer, puis le redescendre dans l'enclave, en engageant le pivot inférieur dans la crapaudine femelle scellée dans le radier.

Une première opération ne réussit pas.

Des caps de soulèvement en charpente ayant été dressés sur le bajoyer (Pl. 40, *fig.* 1), le vantail fut amené, légèrement lesté par l'introduction d'eau dans quatre de ses compartiments inférieurs.

On le dressa au moyen de palans différentiels à chaines frappés sur les caps; mais quelques retards s'étant produits dans la manœuvre, et les caps n'étant pas assez élevés pour soulever suffisamment le vantail et lui permettre d'éviter le haut radier, on reconnut que l'opération ne pouvait s'effectuer, et l'on prit le parti de redescendre le vantail. Cette opération n'ayant pu s'exécuter

assez vivement, la mer baissa plus vite que le vantail qui émergea de plus en plus; la charge devint excessive sur les palans qui rompirent successivement, laissant retomber le vantail à l'eau. Fort heureusement cet accident n'entraîna aucune avarie pour le vantail.

Guidé par cette expérience, on construisit de nouveaux caps plus élevés (Pl. 40, *fig.* 2) et capables de porter une charge totale de 150 tonnes, ce qui permettait de supporter le vantail lesté pourvu qu'il fût immergé seulement sur $3^m,50$ de hauteur; de plus, les quatre petits palans différentiels furent remplacés par six forts palans munis de cordages, d'une force de 25.000 kilogrammes chacun, et actionnés par six cabestans disposés sur le bajoyer. L'emploi de cabestans donnait toute facilité pour faire descendre ou monter le vantail aussi vite qu'il était nécessaire. Enfin deux treuils, attelés sur des amarres fixées à la partie supérieure de la porte, donnaient le moyen d'agir sur celle-ci pour la déplacer parallèlement à l'axe de l'écluse et pour la maintenir dans une position convenable malgré le courant.

Avec le nouveau matériel, la mise en place des quatre vantaux s'est effectuée de la façon la plus simple. A pleine mer, le vantail était soulevé par les six palans de façon à n'être plus immergé que de $3^m,50$ environ. Dans cette situation, il pesait, lest compris, 210 tonnes environ, et déplaçait 80 mètres cubes, la charge sur les palans était donc de 130 tonnes environ.

Le vantail étant ainsi suspendu verticalement dans son enclave, on le descendait au fur et à mesure que la mer baissait.

En même temps, au moyen de pompes, on finissait de le lester, afin d'assurer sa stabilité dans la position verticale. En agissant convenablement sur les palans et sur les treuils horizontaux, il était facile de conserver rigoureusement au vantail sa position. Un plongeur descendu

dans l'écluse indiquait fréquemment les positions relatives du pivot mâle et de la crapaudine, pour faciliter le commandement de la manœuvre à laquelle était employée une équipe de 120 hommes.

Pour le premier vantail, l'opération dura près de quatre heures. Pour les autres, grâce à l'expérience acquise, on réussit à les terminer en moins de deux heures 1/4, ce temps étant compté depuis le moment où le vantail était amené dans l'écluse, jusqu'à celui où il était en place et son collier fermé.

Le même matériel a permis d'opérer très facilement le décrochage des anciens vantaux en bois; seulement, ceux-ci ayant un poids supérieur à celui du volume d'eau déplacé, on dut, pour les faire flotter, les garnir de ceintures de barriques et de flotteurs.

ACCIDENT SURVENU A L'UN DES VANTAUX DES PORTES D'AVAL.

Peu de temps après l'achèvement de la mise en place des deux paires de portes, un accident est survenu à l'un des vantaux d'aval. Cet accident ayant donné lieu à des recherches sur l'emploi de l'acier moulé, nous pensons qu'il peut être utile de le relater ici.

Le 9 octobre 1884, à la marée de jour, la mer était grosse au large, l'avant-port était houleux, et un ressac d'une intensité exceptionnelle se produisait dans l'écluse. Au moment de la fermeture, les vantaux d'aval battirent assez longtemps l'un contre l'autre avant de busquer, et se rouvrirent même plusieurs fois après le buscage, sous l'action du ressac. A la suite de ces chocs répétés, les deux vantaux se rouvrirent une dernière fois de près de la moitié de leur course et vinrent frapper violemment l'un contre l'autre; la dénivellation entre la tenue du bassin

et le niveau de l'eau de l'avant-port était alors de $0^m,40$ environ.

A la marée de nuit suivante, les portes d'aval ne se rouvrirent pas comme d'habitude sous l'action de la mer montante; le chef pontier s'étant avancé sur la passerelle du vantail sud, pour se rendre compte de ce qui se passait, sentit le vantail vaciller sous ses pieds, il se hâta de remonter sur le bajoyer; quelques secondes après le vantail se couchait en travers de l'écluse, l'engageant sur la moitié de sa longueur, et interceptant la navigation. Dès le point du jour, on entreprit d'urgence, avec la plus grande diligence possible, le relèvement du vantail, mais les compartiments étanches inférieurs ayant souffert dans la chute, il fut impossible de le faire flotter en les délestant. On réussit heureusement en soulageant le vantail avec des flotteurs et en agissant à son extrémité à l'aide de cabestans, à le faire pivoter de façon à le rentrer à peu près dans son enclave. L'opération dura trente-six heures; au bout de ce temps, la navigation put reprendre son cours. On remonta les caps qui avaient servi à la mise en place, et, quelques jours après l'accident, on put opérer l'enlèvement du vantail avarié. La pièce qui s'était brisée était le tourillon supérieur. Le piton de 0,30 de diamètre était rompu au droit de son encastrement dans le noyau central de la pièce d'acier dont il faisait partie. Le vantail n'avait éprouvé, d'ailleurs, que de faibles avaries; en s'abattant, il avait seulement arraché de la tôlerie le pivot inférieur. Quelques tôles du bordé étaient, en outre, légèrement déprimées en plusieurs points.

La rupture du tourillon a dû se produire à la marée de jour, au moment du dernier choc des portes l'une contre l'autre, mais le vantail, maintenu par la pression de l'eau du bassin, ne s'est renversé que lorsque la mer montante a tenté de l'ouvrir. Il est assez difficile de se

rendre un compte exact de l'effort qu'a dû supporter le piton et de la façon dont il s'est rompu. Voici, à notre sens, l'hypothèse la plus probable.

Les deux vantaux ayant choqué violemment l'un contre l'autre, ont été repoussés avec force dans leurs enclaves, puis, par suite de la réaction, sont retombés en avant, en prenant un peu de nez ; c'est dans ce mouvement de chute que le piton, venant heurter violemment le collier, s'est rompu. La rupture n'a pas dû se produire, en effet, dans le mouvement de recul, car il résulte de l'examen attentif que nous avons fait des pièces, que dans le mouvement de recul, c'est le sabot qui a porté contre le granit et non le pivot contre le collier. Nous avons constaté, au contraire, la trace d'un choc sur la partie intérieure du collier.

RECHERCHES SUR LA QUALITÉ DE L'ACIER DU TOURILLON BUSQUÉ.

La pièce d'acier qui s'est ainsi rompue, était une pièce d'acier moulé qui n'avait été ni recuite, ni trempée, son poids total était d'environ 3.300 kilogrammes.

A première vue, la cassure présentait un grain assez gros ; sur la plus grande partie de la surface, au centre, on remarquait une partie soufflée d'environ $0^{mq},1125$ de superficie. L'existence de cette soufflure, tout en indiquant que la pièce n'était pas parfaite, ne peut être considérée comme une des causes principales de l'accident, le défaut en question ne diminuant que de 4 p. 100 environ le moment d'inertie du tourillon. Mais une étude plus approfondie du métal a permis de reconnaître qu'il était d'une quantité médiocre. Cette étude a porté à la fois sur l'acier du tourillon supérieur qui s'était rompu, et sur celui du pivot inférieur qui avait été arraché de la

tôlerie et déformé, au moment où le vantail s'était abattu.

20 barrettes furent d'abord découpées dans les parties saines des deux tourillons, 10 dans le sens longitudinal, et 10 dans le sens transversal, 8 ont été expérimentées à la traction, et 12 au choc; une moitié de barrettes a été soumise aux épreuves sans avoir été forgée, l'autre moitié a été forgée avant l'expérimentation.

Les résultats de ces expériences sont consignés dans les tableaux ci-dessous :

ÉPREUVES A LA TRACTION.

DÉSIGNATION et PROVENANCE DES ACIERS	SECTION de l'éprouvette	POIDS ayant déterminé la rupture	RÉSISTANCE par millim. carré	ALLONGEMENT	OBSERVATIONS
1° Barrettes d'acier simplement moulées.					
Pivot supérieur.	mm²	kilogr.	kilogr.	p. 100	
Sens longitudinal. . . .	314,16	14.570	46,38	1,2	Cassure à gros grains.
	314,16	10 820	34,44	0,2	
Pivot inférieur.					
Sens transversal	314,16	9,920	31,58	0,1	Cassure à gros grains.
	314,16	8.720	27,76	0,0	
			140,16	1,5	
Moyennes.			35,04	0,37	
2° Barrettes d'acier reforgé.					
Pivot supérieur.					
Sens longitudinal. . . .	314,16	19.820	63,09	0,1	Cassure à gros grains.
	314,16	15.770	50,20	0,3	
Pivot inférieur.					
Sens transversal	314,16	15.920	50,67	0,2	Cassure à gros grains.
	314,16	15.920	41,13	0,0	
			205.09	0,6	
Moyennes.			51,28	0,15	

ÉPREUVES AU CHOC.

DÉSIGNATION et PROVENANCE DES ACIERS	SECTION de l'éprouvette	HAUTEUR de chute ayant déterminé la rupture (mouton de 12 kil.)	OBSERVATIONS
1° Barrettes d'acier simplement moulées.			
Pivot supérieur.	mm²		
Éprouvette n° 1.	900	1,40	Ruptures obtenues au premier coup.
— 2.	900	0,50	
— 3.	900	0,35	Rupture obtenue en passant par les hauteurs successives de 0,05, 0,10 0,15, 0,20, 0,25 et 0,30.
— 4.	900	0,25	Rupture obtenue en passant par les haut. success. de 0,10, 0,15 et 0,20.
— 5.	900	0,20	Rupture obtenue en passant par les hauteurs success. de 0,10 et 0,15.
— 6.	900	0,15	Rupture obtenue en passant par les hauteurs successives de 0,10.
Total pour les quatre dernières éprouvettes.		0,95	
Moyenne		0,2375	
Pivot inférieur.			
Éprouvette n° 1.	900	0,70	Rupture obtenue au premier coup.
— 2.	900	0,25	
2° Barrettes d'acier reforgé.			
Pivot supérieur.			
Éprouvette n° 1.	900	0,50	Ruptures produites en passant par les hauteurs successives de 0,25, 0,30 0,35, 0,40 et 0,45.
— 2.	900	0,50	
Pivot inférieur.			
Éprouvette n° 1.	900	0,40	Rupture produite au premier choc.
— 2.	900	0,50	Rupture produite après un essai à 0,25 de hauteur.

D'après l'ensemble de ces expériences, on voit que la résistance moyenne à la traction des barrettes moulées a été de $35^k,04$ avec un allongement de 0,37 p. 100, et que la résistance des barrettes reforgées a été de $51^k,28$ avec un allongement moyen de 0,15 p. 100. Les barrettes moulées expérimentées au choc se sont rompues en moyenne sous une hauteur de chute de $0^m,2375$, si l'on

exclut de la moyenne des deux premières barrettes pour lesquelles on a commencé l'épreuve par une hauteur trop forte. En même temps que les barrettes d'acier, nous avons éprouvé une barrette de fonte de 900 millimètres de section ; cette barrette n'a été rompue que sous la chute d'un mouton tombant de 0^m,65 en passant successivement par des hauteurs de 0^m,50, 0^m,55 et 0^m,60.

Ces expériences, faites à l'atelier des forges et chantiers de la Loire au Havre, ont été complétées par des expériences de même nature aux usines d'Imphy sur des barrettes prises en différents points du tourillon brisé.

Le tableau ci-dessous donne le résultat de ces nouvelles épreuves :

NUMÉROS d'ordre	ENDROITS où ont été prélevés les pièces	DIAMÈTRE	SECTION	CHARGES d'élasticité	de rupture	de rupture par millim.	ALLONGEMENT p. 100	OBSERVATIONS
	Barrettes prélevées sur le porte-pivot supérieur.							
		mm	mm	kilogr.	kilogr.	kilogr.		
1	Suivant l'axe longitudinal de.	20,1	317	?	11.700	36,9	0	Défaut léger
2	La pièce est à la surface du plus petit cylindre. .	20,1	317	?	11.400	36,2	0	Pas de défauts.
3	Sur la nervure.	Impossibles à éprouver.						
4	Longitudinalement. . . .							
5	Sur le cercle de base. . .	20,1	317	12.000	12.500	29,4	1	
6	A la circonférence. . . .	20,1	317	11.500	12.700	40,0	1	
7	Sur le cercle de base. . .	20,1	317	?	7.800	24,0	0	
8	Près du petit cylindre. .	20,1	317	?	6.400	20,0	0	Défaut, appréciation impossible.
9	Sur la nervure perpendiculaire à l'axe longitudinal.	20,1	317	?	9.800	31,0	0	Défaut de 1/10e de la section.
	Barrettes prélevées sur le pivot inférieur. (Ces deux éprouvettes n'ont pas été poinçonnées.)							
1	Barrette du pivot inférieur.	20,1	317	11.000	11.300	35,6	1 faible	Section saine.
2		20,1	317	10.000	15.000	47,0	1,5	On a observé plusie limites d'élasticit partir de la cha de 10.000 kilogr.

Ce tableau est assez intéressant en ce qu'il montre les différences qui existent entre les parties d'une même pièce d'acier moulé, d'une forme aussi compliquée que celle qui nous occupe. La résistance des barrettes varie de 20 à 40 kilogrammes, en prenant des valeurs intermédiaires, suivant les points où sont découpées les barrettes d'épreuves.

En dehors de ces expériences, nous avons fait analyser l'acier du tourillon brisé. Cette analyse, opérée à l'École des Mines, a donné les résultats suivants :

	Tourillon supérieur.	Tourillon inférieur.
Carbone	0,885	0,927
Silicium	0,166	0,172
Soufre	0,046	0,068
Phosphore.	0,158	0,287

En nous communiquant le résultat de cette analyse, M. l'ingénieur en chef Carnot, inspecteur de l'École des Mines, nous fit, à ce sujet, les observations suivantes : « Les résultats trouvés accusent une assez grande différence de composition entre les aciers des deux tourillons et, par suite, un défaut d'homogénéité assez grave s'ils ont été fabriqués avec le même acier. La teneur en phosphore est très élevée surtout dans l'acier du tourillon inférieur et peut, à elle seule, expliquer sa rupture accidentelle ; mais, en outre, j'ai observé sur la cassure de l'échantillon deux graves soufflures qui peuvent très bien aussi y avoir contribué, surtout s'il en existait d'autres dans le tourillon (ce qui ne m'étonnerait pas). Enfin, le grain de l'acier est assez grossier. Ce sont autant de raisons qui me paraissent rendre suffisamment compte de la fragilité du tourillon en question. »

De l'ensemble de ces expériences, il ressort que l'acier du tourillon rompu était de qualité médiocre ; il manquait

d'élasticité et de résistance au choc, de plus, sa composition chimique laissait à désirer; il contenait un excès notable de phosphore, excès fâcheux étant donné surtout le degré élevé de carburation (*).

Après avoir indiqué la nature de l'acier du tourillon rompu, il ne nous paraît pas inutile de faire connaître, ne fût-ce qu'à titre de comparaison, les résultats de quelques essais que nous avons faits sur des aciers moulés de diverses provenances.

Voici tout d'abord les résultats d'épreuves faites sur des aciers moulés destinés aux heurtoirs des portes du bassin Bellot, au Havre.

ÉPREUVES A LA TRACTION.

DÉSIGNATION DES BARRETTES	SECTION de l'éprouvette	CHARGES de rupture totales	CHARGES de rupture par millim. de section	ALLONGEMENTS correspondants aux charges de rupture	OBSERVATIONS
1° Acier simplement moulé.					
	mm²	kilogr.	kilogr.	p. 100	
Éprouvette n° 1. . .	132,73	7.750	58,4	11,2	Grain fin.
— 2. . .	132,73	7.950	59,8	8,0	
2° Acier reforgé.					
Éprouvette n° 1. . .	153,94	9.650	62,6	19,0	Grain fin.
— 2. . .	153,94	10.600	62,8	16,0	

(*) Dans le Mémoire inséré dans les *Annales* du mois d'avril 1885, M. l'Ingénieur en chef Considère émet l'avis que la teneur, ou phosphore dans les pièces d'acier, ne doit pas dépasser 0,10 à 0,12 dans une fabrication bien réglée.

ÉPREUVES AU CHOC.

DÉSIGNATION DES BARRETTES	SECTION de l'éprouvette	HAUTEUR de chute ayant déterminé la rupture (mouton de 12 kil.)	OBSERVATIONS
1° Acier simplement moulé.			
	mm²	mètres	
Éprouvette n° 1. . .	900	2,25	Ruptures obtenues après un essai de 2 mètres de hauteur.
— 2. . .	900	2,25	
2° Acier reforgé.			
Éprouvette n° 1. . .	961	»	La barrette n'a pas été rompue après 4 coups à 2m,25 et 8 coups à 2 mètr. avec un mouton du poids de 40 au lieu de 12 kilogr. Flèche : 13 millim. Rupture à 3 essais à 2m,25 avec le mouton de 12 kilogr. et 4 coups à 2 mètr. avec le mouton de 40 kilogr., la barrette ayant été retournée au 2e coup.
— 2. . .	961	»	

Le tableau suivant est relatif à des essais faits à Witten (Allemagne) par la marine espagnole ; il s'agit d'acier coulé pour des affûts et non recuits. Nous devons la communication de ces épreuves à l'obligeance de M. le capitaine Gonzalez, de la marine royale espagnole.

DÉSIGNATION DES BARRETTES	DIAMÈTRE	LONGUEUR de l'éprouvette	RÉSISTANCE par millim. carr.	ALLONGEMENT	OBSERVATIONS
	millim.	millim.	kilogr.	p. 100	
Éprouvette n° 1. . .	13,8	100	62,0	4,0	Cassure à grain.
— 2. . .	13,8	100	58,0	2,0	
— 3. . .	13,8	100	66,0	4,5	
— 4. . .	13,8	100	59,0	3,0	
— 5. . .	13,8	100	62,0	4,0	
— 6. . .	13,8	100	58,0	2,5	
— 7. . .	13,8	100	72,6	9,0	
— 8. . .	13,8	100	74,0	6,0	
— 9. . .	13,8	100	72,0	5,0	
— 10. . .	13,8	100	81,0	11,0	
— 11. . .	13,8	100	73,3	8,0	
— 12. . .	13,8	100	73,3	11,0	
			811,2	70,0	
Moyennes.			67,6	5,83	

Ces essais, dont les résultats sont fort supérieurs à ceux qu'a donné l'acier du tourillon rompu, montrent bien que cet acier était de médiocre qualité.

Nous devons cependant faire remarquer que les expériences faites sur l'acier du tourillon brisé ne sont pas tout à fait comparables à celles que nous venons de relater et qui ont porté sur des barrettes provenant de lingots coulés, en même temps que les pièces, dont il s'agissait d'éprouver la qualité. Les résultats fournis pour ces barrettes sont évidemment supérieurs à ceux qu'on aurait obtenus en opérant sur des barrettes prises dans la pièce elle-même, surtout lorsque la pièce est de grande dimension et de formes tourmentées. L'écart peut parfois être considérable. M. Parent, ingénieur du service technique des chemins de fer de l'État, nous a communiqué à ce sujet des expériences faites aux aciéries de la marine Saint-Chamont; la résistance des éprouvettes prises dans ses lingots variant de $81^k,8$ à $51^k,5$, avec des allongements correspondant de 11 p. 100 et 19 p. 100, la résistance d'éprouvettes prises dans la pièce elle-même a varié de $52^k,5$ à $37^k,9$ avec des allongements de zéro à 15,5 p. 100.

L'acier du tourillon rompu étant de l'acier simplement moulé n'ayant pas été soumis aux opérations du recuit ou de la trempe à l'huile, nous avons dû nous demander si cette omission avait pu être fâcheuse au point de vue de la résistance au choc du métal.

Nous nous sommes enquis de ce qui se pratique d'une part aux usines de Terre-Noire, en France, et d'autre part aux aciéries de Witten, en Allemagne, qui passent pour fabriquer un acier industriel d'excellente qualité. Il résulte des renseignements pris qu'à Terre-Noire, comme à Witten, l'opération de recuit est considérée comme des plus essentielles, lorsque l'on veut obtenir des aciers doux, ainsi que cela était utile dans l'espèce. Le recuit pratiqué dans des conditions convenables a pour effet, sans diminuer sensiblement la résistance à la traction,

d'augmenter notablement l'allongement du métal; cependant l'opération du recuit a d'autant moins d'efficacité que les pièces ont de plus grandes dimensions. On peut même se demander si, pour des pièces aussi grandes que le tourillon rompu, l'efficacité du recuit eût été bien réelle. En ce qui concerne la trempe à l'huile, la pratique constante semble la proscrire lorsqu'il s'agit de pièces de grandes dimensions par suite de la crainte des gerçures.

Bien que le recuit ne semble avoir pour les grandes pièces qu'une influence légère, nous avons fait procéder au recuit de pièces d'acier destinées à la reconstruction des portes d'écluse du bassin Bellot au port du Havre. Ces pièces sont d'ailleurs plus simples de formes et moins grandes que celles des transatlantiques. Les résultats des essais obtenus sont consignés ci-dessous; nous devons insister sur ce point, que les essais ont été faits sur des barrettes non prélevées sur les pièces, mais découpées dans des lingots coulés en même temps.

ÉPREUVES A LA TRACTION.

DÉSIGNATION DES BARRETTES	SECTION de l'éprouvette	CHARGES de rupture totales	CHARGES de rupture par millim. de section	ALLONGEMENTS correspondants aux charges de rupture	OBSERVATIONS
1° Acier moulé, puis recuit.					
	millim.	kilogr.	kilogr.	p. 100	
Éprouvette n° 1. . .	132,7	6.125	46,20	21,5	Grain fin.
— 2. . .	132,7	6.100	46,00	11,7	
— 3. . .	132,7	7.400	55,75	13,0	
— 4. . .	132,7	6 300	47,46	13,0	
			195,41	59,2	
Moyennes.			48,85	14,8	
2° Acier moulé, recuit, puis forgé.					
Éprouvette n° 1. . .	132,7	6.100	46,0	21,5	Grain fin.
— 2. . .	132,7	5.950	44,8	11,6	
— 3. . .	132,7	7.750	58,4	20,0	
			149,2	53,1	
Moyennes.			49,7	17,7	

ÉPREUVES AU CHOC.

DÉSIGNATION DES BARRETTES	SECTION de l'éprouvette	HAUTEUR de chute ayant déterminé la rupture (mouton de 12 kil.)	OBSERVATIONS
1° Acier moulé, puis recuit.			
	mm²	mètres	
Éprouvette n° 1. . .	900	2,25	Rupture produite en passant par des hauteurs intermédiaires de 1 mètr., 1m,25, 1m,50, 1m,75 et 2 mètr.
— 2. . .	900	2,00	Rupture produite en passant par les haut. interméd. 1 mètr., 1m,25, 1m,50, 1m,75.
— 3. . .	900	2,25	Pas de rupture. Haut. interméd. 1 mètr., 1m,25, 1m,50 et 1m,75. Flèche, 10 millim.
— 4. . .	900	2,25	
2° Acier moulé, recuit, puis forgé.			
Éprouvette n° 1. . .	900	2,00	Rupture produite en passant par les haut. interm. de 1 mètr., 1,25, 1m,50 et 1m,75.
— 2. . .	900	2,25	Pas de rupture. Haut. interméd. 1 mètr., 1m,25, 1m,50 et 1m,75. Flèche, 3 millim., après 3 coups 9 millim.
— 3. . .	900	2,25	Pas de rupture. Haut. interméd. 1 mètr., 1m,25, 1m,50 et 1m,75. Flèche, 8 millim., apres 2 coups 15 millim.

On voit que la résistance moyenne des barrettes moulées et recuites atteint 48k,85 par millimètre carré, avec 14,8 p. 100 d'allongement, et que les barrettes reforgées ont une résistance de 49k,7 par millimètre carré, avec un allongement de 17,7 p. 100. Ces résultats prouvent que l'acier destiné au bassin Bellot est de qualité supérieure à celui employé à l'écluse des transatlantiques; nous ferons d'ailleurs ramarquer que l'usine avait apporté le plus grand soin à la fabrication, et avait *recommencé* à plusieurs reprises des pièces défectueuses.

De l'étude qui précède on peut tirer la conclusion que, dans l'état actuel de la science, l'acier moulé est un métal capricieux, difficile à obtenir de bonne qualité, pour des pièces de fortes dimensions, et dont la valeur ne peut

être qu'approximativement constatée, lorsqu'on ne peut faire des essais sur des barrettes prises dans l'intérieur même de la pièce. Il peut rendre les plus grands services pour toutes les pièces travaillant à la compression, *ou à la traction sans choc*, mais on ne saurait sans danger le substituer au fer ou à l'acier forgé, dans les pièces qui ont à résister à des chocs. Il a y lieu, en particulier, d'en proscrire l'emploi pour les tourillons des portes d'écluse.

MESURES PRISES POUR ÉVITER DE NOUVEAUX ACCIDENTS.

1° *Remplacement des tourillons supérieur et inférieur par des pièces en fer forgé.* — A la suite de l'accident que nous venons de relater, l'Administration a décidé tout d'abord, sur notre proposition, de remplacer les tourillons inférieur et supérieur des deux nouvelles paires de portes de l'écluse des transatlantiques par des tourillons en fer forgé. Les formes adoptées pour ces nouvelles pièces sont reproduites à la Pl. 39, fig 9 à 16. Nous ferons remarquer que le tourillon supérieur est en deux pièces, que l'axe ne fait pas corps avec le moyeu, mais est rapporté; l'assemblage est assuré au moyen d'une clavette; les deux pièces sont emmanchées à chaud. Cette disposition a été adoptée au point de vue du travail de forge, afin d'avoir pour le piton du tourillon une pièce de fer forgé, dont les mises puissent être placées à la forge parallèlement à l'axe longitudinal, ce qui n'eût pas été possible si le piton était venu de forge avec le moyeu.

2° *Construction de portes-valets pour la paire de portes d'aval.* — Cette première mesure fut complétée par la construction de portes-valets pour contre-buter en cas de houle la paire de portes d'aval. Les anciennes

portes en bois étaient munies de valets, mais ils étaient hors de service et n'étaient plus manœuvrés depuis bien longtemps.

Les nouveaux valets sont figurés sur la planche 39. Ils sont en fer et en bois; les pièces travaillant à l'extension sont en fer. Un dispositif spécial permet d'assurer convenablement le contact des valets avec les butoirs placés sur les portes d'écluse. Le contact s'établit par l'intermédiaire de coins qui peuvent être mus dans une glissière au moyen d'un petit volant, situé à la partie supérieure des portes-valets. Les coins se décalent très facilement de la même façon au moment de l'ouverture des portes.

3° *Établissement de chaînes de retenue munies de ressorts.* — Nous avons recherché enfin les moyens de diminuer l'influence néfaste des chocs auxquels les portes sont exposées au moment de leur fermeture. Nous les avons dans ce but munies de ressorts de retenue.

Chaque vantail en dehors des chaînes de manœuvre porte, attachée sur la partie supérieure de sa face amont, une chaîne de retenue qui est destinée à empêcher la partie supérieure du vantail de dépasser sa position d'équilibre dans le battement qui se produit à la fermeture. Sur cette chaîne, qui est amarrée sur le bajoyer de l'écluse, est interposé un ressort Belleville de 30 tonnes environ de puissance pour une course de $0^{m},210$. Ledit ressort peut être tendu plus ou moins au moyen d'un levier qui agit sur un pas de vis par l'intermédiaire d'un écrou.

La longueur des chaînes de retenue est fixée de telle façon qu'au moment de la fermeture des portes, les deux vantaux ne peuvent venir choquer l'un contre l'autre, ils sont arrêtés par leurs retenues à quelques centimètres de la position où le buscage commence. Ces derniers centimètres sont parcourus avec une faible vitesse,

chaque vantail devant pour continuer sa course exercer sur sa retenue une traction susceptible de vaincre la tension du ressort. Suivant la valeur donnée à cette tension, la vitesse de fermeture est plus ou moins grande. L'interposition des ressorts a donc pour effet d'empêcher complètement, en temps ordinaire, les chocs qui ont lieu à la fermeture. Ils ont aussi pour effet de diminuer notablement ceux qui se produisent sous les effets de la houle. Supposons, en effet, que les portes soient fermées, les ressorts de chaque vantail ayant une tension de 30 tonnes. Lorsque la porte se rouvre sous l'effet du ressac, les ressorts se détendent immédiatement ; au moment où les portes se referment, elles doivent, avant de se busquer, tendre à nouveau les ressorts. Le travail développé dans le choc est donc diminué du travail qui a été nécessaire pour tendre les deux ressorts.

On pourrait objecter qu'en raison de l'effort qu'ils exercent vers l'amont les ressorts tendent à prolonger la durée de la période pendant laquelle le ressac est susceptible de rouvrir les portes. Il suffit pour obvier à cet inconvénient de détendre les ressorts dès que la baissée de la mer est suffisante pour que l'effet du ressac ne soit plus à craindre. Cette opération se fait facilement en agissant sur le pas de vis de réglage dont nous avons parlé.

Les ressorts dont il vient d'être question ont été exécutés par les forges de la marine de Saint-Chamont.

DÉPENSES.

Le prix de revient d'une paire de portes, établi au moyen du décompte définitif de l'entreprise, ressort à 310.000 francs. Le détail de cette dépense est donné dans le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION DES TRAVAUX	QUANTITÉS	PRIX de l'unité	SOMMES partielles	SOMMES totales
Métaux.	kilogr.	fr.	francs	francs
Fers laminés, tôles, cornières, etc.	282.485,72	0,67	189.265,43	
Tubes en fer	2.608,00	0,77	2.008,16	
Ouvrages en fer forgé de sujétion	9.254,75	3,47	32,113,99	
— — pour traverses de boulons	1.671,25	2,75	4.595,94	
Ouvrages en fer forgé pour boulons	3.638,80	0,87	3.165,76	
— en tôle d'acier	2.560,00	1,17	2.995,20	
— en acier doux	5.668,25	1,97	11.166,46	
Galvanisage	304.133,02	0,20	60.826,61	
Ouvrages en bronze	1.096,00	5,50	6.028,69	
— en fonte de deuxième fusion	1.914,50	0,48	918,96	
Acier doux fondu pour tourillons	10.536,75	1,65	17.385,64	
				330.470,84
Charpente.	mc	fr.	francs	
Bois	15,429196	245,00	3.780,15	
Mailletage avec clous à maugère	76,1242	15,60	1.187,54	
Mailletage avec pointes de Paris	72,8349	28,30	2.061,23	
				7.028,92
Total				337.499,76
A déduire : le rabais de 19 p. 100				64.124,95
Reste				273,374,81
Dépenses sur la somme à valoir : 2 pompes, clapets, pulsomètre, etc.				23.625,19
Démolition et reconstruction des bajoyers au-dessus des ouvrages ; refouillements				13 000,00
Total				310.000,00

La dépense pour les portes-valets s'est élevée à 76.000 francs, conformément au tableau suivant :

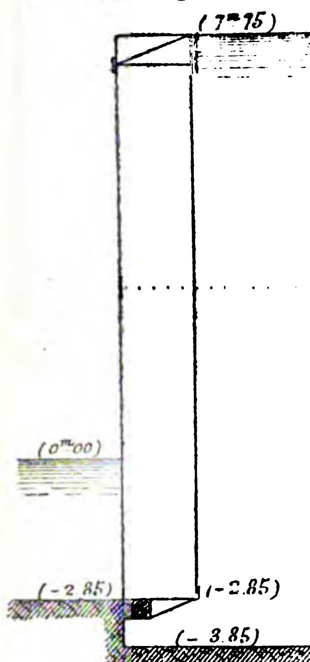
DÉSIGNATION DES TRAVAUX	POIDS	PRIX de l'unité	SOMMES partielles
	kilogr.	francs	francs
Fers et tôle	15.509,540	0,67	10.391,39
Fer forgé pour tirant	5.604,010	2,75	15.411,03
— pour boulons	1.786,000	0,87	1.553,82
Pattes d'accrochage	568,000	2,75	1.562,00
Bois	42,274	180,00	7.609,32
Fonte	3.023,000	0,50	1,511,50
Mailletage avec clous à maugère	280,320	15,60	4.372,99
— avec pointes de Paris	118,740	28,30	3.360,34
Bronze	1.535,000	4,50	6.907,50
Tuyaux	152,380	0,77	117,33
Chaînes de manœuvres	733,000	2 00	1.466,00
Galvanisage	26.057,500	0,20	5.211,50
Mise en place des portes-valets	»	»	3.500,00
Butoir des portes et appropriation des entretoises	»	»	9.700,00
Chaînes de retenue	1.500,000	2.00	3.000,00
Frais de surveillance	»	»	325,28
Somme totale			76.000,00

Les ressorts pour les chaînes de retenue ont coûté 1.500 francs pièce.

CALCULS JUSTIFICATIFS.

I. Portes fermées.

Observation préliminaire. — Les hautes mers de vive eau d'équinoxe, s'élevant à la cote (8^m,15) et les portes n'étant fermées que lorsque la mer a baissé de 40 centimètres, la charge maxima à laquelle elles sont exposées correspond, au cas où le niveau de l'eau se trouve à l'amont, à la cote (7^m,75) et, à l'aval, à la cote (0) qui est celle des plus basses mers connues.



La résultante des pressions qu'une tranche verticale de 1 mètre de largeur de la porte a à supporter, dans ce cas, est représentée par le trapèze ABCD, différence des deux triangles ABE, FBG. Elle a pour valeur algébrique $P \times \frac{h^2 - h'^2}{2}$, si l'on désigne respectivement par h' les hauteurs d'eau d'amont et d'aval au-dessus du busc respectivement égales à 10^m,60 et à 2^m,85 ; la distance du puits d'application de la résultante au point B est d'ailleurs égale à $\frac{1}{3}\frac{h^3 - h'^3}{h^2 - h'^2}$.

Les efforts transmis à la traverse supérieure, d'une part, au busc, d'autre part, auront donc pour valeur :

$$A = P \times \frac{h^2 - h'^2}{2} \times \frac{1}{3}\frac{h^3 - h'^3}{h^2 - h'^2} = P\frac{h^3 - h'^3}{6h} = 18,34\,P,$$

$$B = P \times \frac{h^2 - h'^2}{2}\left(h - \frac{1}{3}\frac{h^3 - h'^3}{h^2 - h'^2}\right) = P\frac{2h^3 - 3hh'^2 + h'^3}{6h} = 33,78\,P.$$

Si l'on négligeait la pression qui s'exerce à l'aval, les efforts deviendraient

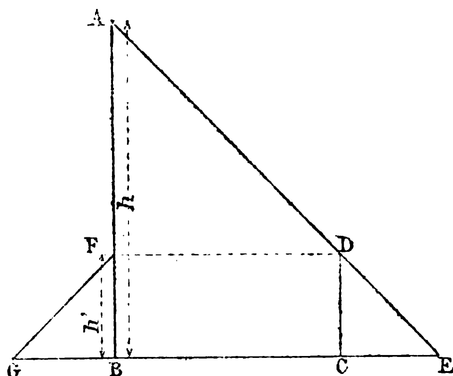
$$A' = \frac{1}{3}\frac{Ph^2}{2} = 18{,}73\,P,$$

$$B' = \frac{2}{3}\frac{Ph^2}{2} = 37{,}45\,P.$$

Il résulte de là que A' et B' sont respectivement plus grands que A et B et que l'on a :

$$\frac{A'}{A} = 1{,}02, \quad \frac{B'}{B} = 1{,}11; \quad \frac{A'+B'}{A+B} = \frac{\pi'}{\pi} = 1{,}07.$$

Si donc, dans le but de simplifier les calculs, on fait abstraction de la pression d'aval, on se placera dans une



condition plus défavorable que le cas le plus défavorable de la pratique, mais les efforts résultant de cette hypothèse ne dépasseront les efforts réels que de 2 p. 100 pour la traverse supérieure, 7 p. 100 pour les montants verticaux et 11 p. 100 pour le busc. Ce dernier présentant une résistance beaucoup plus que suffisante, on voit que l'hypothèse en question conduira à des dimensions qui augmenteront la sécurité sans être cependant exagérées.

Bordages. — Le bordage est formé de tôles rivées sur des membrures horizontales fixées elles-mêmes aux montants verticaux. L'épaisseur est de $0^m{,}012$ dans la partie

inférieure de la porte, de $0^m,010$ dans la partie moyenne, et de $0^m,08$ dans la partie supérieure.

L'espacement des membrures varie d'ailleurs depuis le bas jusqu'en haut de la porte.

Soit d l'espacement de deux membrures consécutives, h, la hauteur du niveau de l'eau au-dessus de la membrure inférieure; la pression moyenne, pour unité de surface, sur la tôle, dans l'intervalle d, sera :

$$\pi = 1.026\left(h - \frac{d}{2}\right),$$

1,026 étant la densité de l'eau de mer.

La tôle peut être considérée comme encastrée sur chaque membrure. On obtiendra donc l'effet maximum en kilogrammes R, développé dans le fer du bornage par l'équation

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\pi d^2}{12} = 1.026\left(\frac{h-d}{2}\right)\frac{d^2}{12}.$$

En remplaçant successivement, dans cette formule, h et d par leurs différentes valeurs, on constate que le travail du métal ne dépasse pas $4^k,4$ au-dessous de la première entretoise intermédiaire, en partant du bas; $4^k,64$, dans la zone comprise entre les deux entretoises intermédiaires, et $4^k,64$, au-dessus de la deuxième entretoise.

Membrures. — En conservant les notations du paragraphe précédent et appelant respectivement d_1 et d_2, les intervalles compris entre une membrure placée à une hauteur h au-dessus du niveau de l'eau d'amont et les deux membrures placées immédiatement au-dessus et au-dessous d'elle, la charge par mètre courant de la membrure considérée et donnée avec une approximation très suffisante par la formule :

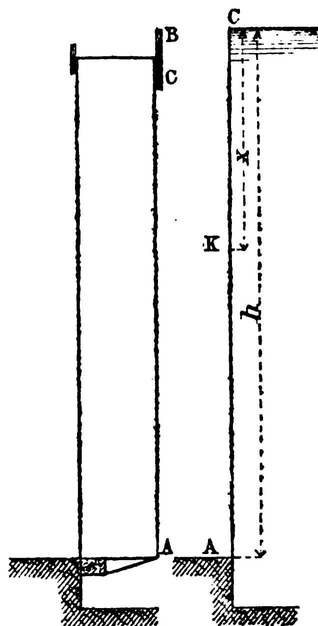
$$\pi_1 = 1.026^{\mathrm{kg}} \frac{d_1 + d_2}{2} h.$$

En considérant les membrures comme simplement appuyées à leurs deux extrémités et en désignant par l leur longueur uniforme, on aura l'équation :

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \pi_1 \frac{l^2}{8} = 1.026 \frac{d_1 + d_2}{2} \frac{hl^2}{8}.$$

La substitution dans cette formule des différentes valeurs de d_1, d_2 et h apprend que les membrures les plus fatiguées ne travaillent qu'à raison de $6^k,9$ par millimètre carré en dessous de l'entretoise intermédiaire inférieure de $6^k,6$ dans la région comprise entre les deux entretoises intermédiaires et de $3^k,9$ dans la région située au-dessus de l'entretoise intermédiaire supérieure.

Montants verticaux. — Chaque montant vertical est appuyé à ses deux extrémités A et C sur la traverse supérieure et sur la traverse inférieure, et reçoit par l'intermédiaire du bordage et des membrures la charge que la hauteur d'eau AB produit sur une bande de $1^m,443$ de largeur.



Pour simplifier les calculs, on peut négliger la différence de niveau de $0^m,50$ entre B et C et nous supposerons que le niveau C est relevé jusqu'en B, ce qui a pour effet de nous placer dans des conditions plus défavorables que les conditions réelles.

Le montant doit, dans cette hypothèse, être étudié comme une poutre verticale appuyée à ses deux extré-

mités et pressée par une masse d'eau dont la surface libre est au niveau de l'appui supérieur C.

Soit h la hauteur AC entre les deux appuis, l la largeur de la tranche d'eau dont la charge est supportée par le montant.

π, le poids du mètre cube d'eau de mer;

X, le montant fléchissant en un point K, dont la disdance à l'appui supérieur considéré comme origine des coordonnées est x;

α, la valeur variable des abscisses des points compris entre K et C.

Si l'on observe que la réaction de l'appui C a pour valeur $\frac{\pi l h^2}{6}$, le moment fléchissant X est donné par l'équation :

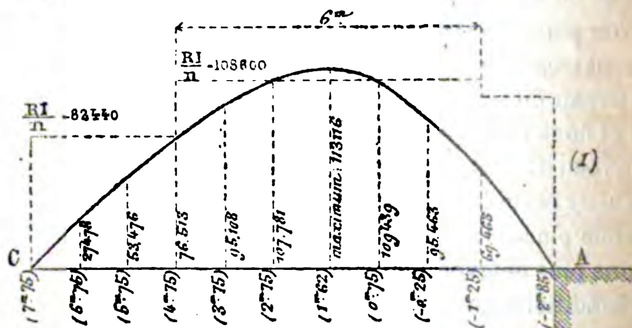
$$X = \frac{-\pi l h^2 x}{6} + \int^x \pi l \alpha (x - \alpha) d\alpha = \pi l \left(\frac{x^3 - h^2 x}{6}\right).$$

Le moment maximum a lieu pour $x = \frac{h}{\sqrt{3}} = 0{,}578\, h$ et a pour valeur $\frac{1}{9} \pi l \frac{h^3}{\sqrt{3}}$ 113.051 kilogrammes.

Les effets tranchants F sont donnés par la formule :

$$F = \frac{d\chi}{dx} = \frac{\pi l}{6} (3x^2 - h^2).$$

L'épure ci-dessous figure les moments fléchissants aux

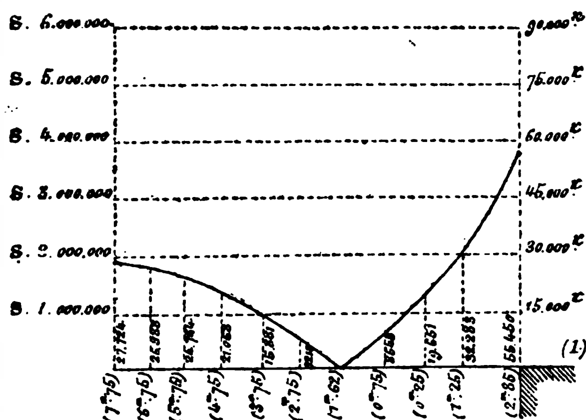


(*) Les lignes pointillées horizontales représentent la valeur de $\frac{Rl}{n}$, dans les différentes parties de la poutre pour $R = 6.000.000$ kilogr.

différents points du montant. Elle montre que le travail du métal est partout inférieur à $6^k,25$ par millimètre carré. Elle justifie, en outre, la répartition adoptée pour les tôles des semelles.

En raison de l'hypothèse faite au début des calculs, le travail maximum sera réellement inférieur de 7 p. 100 à $6^k,25$; il ne sera donc que de $5^k,82$.

D'autre part, si l'on suppose que l'âme supporte seule l'effort tranchant, on peut également dresser l'épure suivante, de laquelle il résulte que la réaction développée



par l'effort tranchant ne dépasse pas 4 kilogrammes par millimètre carré.

Poteaux tourillon et busqué. — Le poteau tourillon est soulagé en chaque point par la réaction du chardonnet ; il n'éprouvera donc aucune fatigue.

Quant au poteau busqué, le travail qu'il fournit peut se calculer comme il suit :

Soit l la largeur de la tranche d'eau qui exerce directement sa pression sur ce poteau.

(*) Les lignes horizontales pointillées représentent les efforts de 1, 2, 3, 4, et 6 kilogr. par millimètre carré.

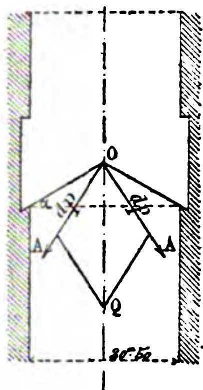
Sur chaque élément dx de la hauteur h, on a, en conservant les notations précédemment adoptées, une charge élémentaire

$$dp = \pi lxdx.$$

qu'on peut considérer comme agissant perpendiculairement au busc (en négligeant l'inclinaison de la face d'amont sur la face d'aval).

Mais, d'autre part, le poteau busqué de l'autre vantail subit au même niveau x une charge élémentaire dp perpendiculaire à l'autre face du busc.

Soit α, l'angle du busc avec la normale au bajoyer. Les deux forces OA, OA′, égales à dp, se composent suivant une force OQ égale à $2\,dp \cos\alpha$, et c'est sous l'action de cette force OQ que l'ensemble des deux poteaux busqués tend à fléchir vers l'aval. Chacun d'eux doit donc être considéré en définitive comme soumis en chaque point à une force élémentaire $dp \cos\alpha = \pi l x \cos\alpha\, dx$ parallèle à l'axe de l'écluse et faisant par suite avec le busc un angle égal à $\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$.



D'après la formule établie ci-dessus, le moment fléchissant maximum produit sur la poutre par l'action de ces forces élémentaires aura pour valeur :

$$X_n = \frac{h^3}{9\sqrt{3}} \pi l \cos\alpha.$$

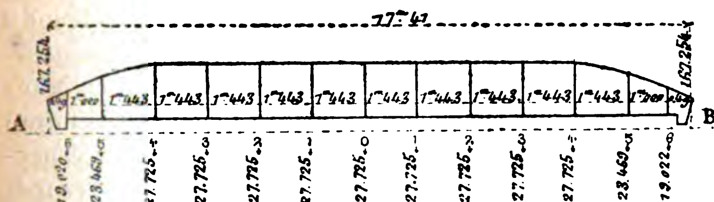
Si l'on appelle I_α, le moment d'inertie de la section de la poutre, par rapport à un axe qui passerait par son centre de gravité perpendiculairement aux bajoyers et n la plus grande distance entre cet axe et le contour de la

section, l'effort maximum R par unité de surface sera donné par la formule :

$$R = \frac{h^3}{9\sqrt{3}} \times \pi l \cos \alpha \, \frac{n}{I_\alpha}.$$

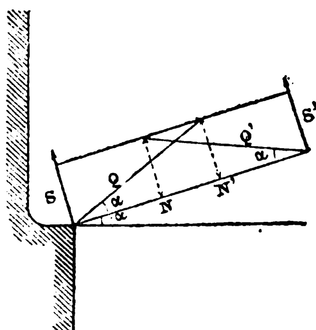
En remplaçant les lettres par leurs valeurs numériques, on trouve que le travail maximum du fer par millimètre carré est de $5^k,29$.

Traverse supérieure. — La traverse supérieure est soumise en chacun des points 4, 3, 2, 1, 0, 1, 2, 3, 4, aux charges qui lui sont transmises par les montants verticaux.



Chacune de ces charges est égale à $\frac{1}{3}\, 1.026\, \frac{h^2}{2}\, l$.

Aux points 5, les faces intérieures des poteaux tourillon et busqué transmettent à la traverse des charges égales à $\frac{1}{3}\, 1.026\, \frac{h^2}{2}\, \frac{l + l_1}{2}$.



L'ensemble de toutes ces charges donne un total égal à $1.026\, \frac{h^2}{2}\, L = 334.507^k$.

La réaction Q', qui s'exerce au contact des traverses supérieures des deux vantaux et la réaction Q entre la traverse supérieure de

chaque vantail et le chardonnet correspondant se décomposeront chacune en deux forces :

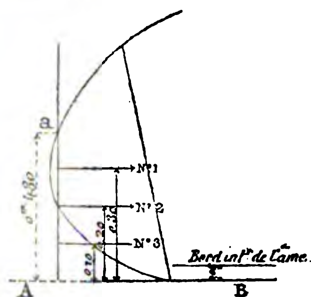
1° Une force S perpendiculaire au busc, égale et opposée à la moitié de la charge totale de 334.507 kilogrammes qui provient de l'action des pressions d'eau sur la traverse supérieure par l'intermédiaire des pièces montantes, $S = 167.254^k$.

2° Une force N, parallèle à la direction du busc et égale à $S \operatorname{cotg} \alpha = 167.254 \times 2.7675 = 462.875^k$ (α étant l'angle du busc avec la normale au bajoyer).

L'intensité de Q est égale à $\dfrac{S}{\sin \alpha} = \dfrac{167.254}{0,33983} = 492.170^k$ et l'on voit, par l'examen de la figure, que l'angle que fait la normale au bajoyer, avec la direction de la réaction du chardonnet, est égale à 2α.

Le sabot en acier par lequel la traverse supérieure s'appuie sur la maçonnerie, épouse exactement la forme du chardonnet. Les sabots en acier qui garnissent respectivement l'autre extrémité de chacune des traverses supérieures, se touchent suivant un plan vertical parallèle aux bajoyers, et par suite normal à la réaction Q.

Le contact entre le chardonnet et le sabot qui s'y appuie présente un développement de 0,93, suivant l'horizontale, le point a, où finit ce contact du côté de l'amont (voir la figure ci-contre) est à $0^m,480$ de la droite AB.



Soient Ω la superficie d'une section quelconque de la poutre, faite par un plan perpendiculaire au busc, I, le moment d'inertie de cette section, par rapport à un ax qui passerait par le centre de gravité, perpendiculairement au plan des forces; n, la distance de l'extrémité d'aval

de la section audit axe; n', la distance de l'extrémité d'amont au même axe; x, les distances de la section considérée aux diverses forces et réactions P, perpendiculaires au busc qui sont comprises entre cette section et l'extrémité de droite de la poutre; d, la distance du centre de gravité de la section à la droite parrallèle au busc, suivant laquelle agissent les réactions N; X, le moment fléchissant, par rapport au centre de gravité de la section des forces extérieures qui agissent entre cette section et l'extrémité de droite de la poutre; N, la composante parallèle au busc de la réaction des appuis; R, l'effort maximum par unité de surface développé dans le métal au point dont la distance au centre de gravité est n; R′, le même effort au point dont la distance du centre de gravité est n; R et R′ étant positifs quand ils représentent une tension;

On a, en négligeant l'inclinaison de la fibre neutre de la poutre sur la direction du busc (voir Collignon, résistance des matériaux, nouvelle édition, p. 210 et 211):

$$(1)\qquad R = X\frac{n}{I} + \frac{N}{\Omega},$$

$$(2)\qquad R = X\frac{n'}{I} + \frac{N}{\Omega}.$$

X étant d'ailleurs déterminé par l'équation

$$(3)\qquad X = \Sigma P x' - N d.$$

Le point d'application effectif de chacune des réactions Q est inconnu, et il variera en réalité suivant les circonstances. Mais, en raison des formes des sabots, et par suite de la compressibilité de la matière, on peut être certain qu'il se trouvera assez notablement en dedans des points où le contact s'établit. On se rendra donc un compte suffisamment exact des efforts que peut avoir à subir le métal, en supposant que la droite qui joint les

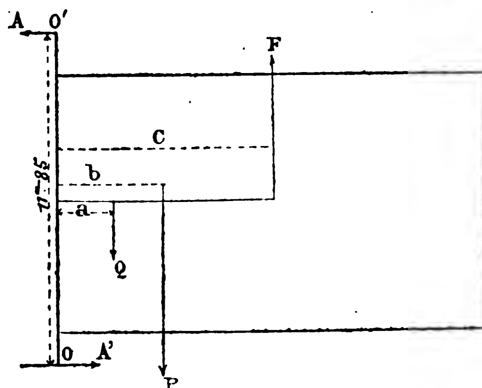
points d'application des réactions Q est parallèle au busc, et en admettant successivement que cette droite est à $0^m,300$, $0^m,200$, puis $0^m,100$ de la droite AB.

En effectuant les calculs, dans ces différentes hypothèses, on constate qu'en aucun point les tensions ni les compressions ne dépasseront $6^{kg},12$ par millimètre carré, même dans le cas le plus défavorable.

Traverse inférieure. — La traverse inférieure n'a à subir que des pressions locales, partout contre-butées. On vérifie aisément que les dimensions attribuées à la traverse et à la fourrure qui butte contre le busc suffisent et au delà pour assurer la résistance et prévenir l'écrasement tant du métal lui-même que de la fourrure en bois et du granit qui forme le busc.

II. Portes ouvertes.

Il résulte de ces positions respectives de la chambre à eau et de la chambre à air, que la résultante P du lest



d'eau et du poids propre du vantail passe entre l'axe de rotation OO' et la résultante F des sous-pressions, et

comme cette dernière force est naturellement moindre que la première, la résultante générale Q qui est parallèle aux deux autres et égale à leur différence tombe entre la résultante des poids P et l'axe de rotation. On a en effet :

$$Q = P - F, \quad Qa = Pb - Fc.$$

Plus Qa sera faible, moindres seront les efforts exercés par le vantail sur les attaches, Q devant, d'ailleurs, avoir une valeur assez forte pour que le choc d'un navire ne puisse pas faire sortir le vantail de sa position, en le soulevant.

Le lest d'eau est constitué par un volume de $52^{m^3},1$ qui pèse 53.500 kilogrammes.

Il a été calculé de façon que, lorsque le vantail est noyé jusqu'au-dessus de la traverse supérieure, la différence Q reste encore quelque peu supérieure à 25.000 kilogrammes ; mais le maximum de Q étant ainsi limité, la construction est disposée pour que la valeur du moment Qa soit faible. Les deux cas extrêmes dans lesquels on peut avoir à manœuvrer les portes, sont : 1° celui où le vantail est complètement noyé jusqu'au-dessus du niveau de la traverse supérieure ; 2° celui où le vantail est immergé jusqu'à $1^m,40$, en contre-bas du niveau des plus faibles hautes mers de morte eau. Il convient d'examiner également le cas où le vantail étant resté en chambre à la pleine mer, on aurait à le faire tourner à mer basse pour le visiter ou le réparer. Dans ce dernier cas, on peut admettre que le vantail aura été au préalable délesté. Les valeurs de Q et de Qa, dans ces trois hypothèses, sont résumées dans le tableau suivant :

DEGRÉ d'immersion du vantail	POIDS effectif du vantail, lest compris P	Sous-pression F	RÉSULTANTE du poids et de la sous-pression Q	MOMENT du poids du vantail lesté par rapport à l'axe de rotation Pb	MOMENT de la sous-pression Fc	MOMENT de la résultante Qa = Pb − Fc
	kilogr.	kilogr.				
Complète	203,200	173.000	30,200	1.539.886	1.455.795	84.091
Jusqu'à la côte 4^{m},45 . .	203,200	168.800	42.400	1.539.886	1.353.132	186.754
Jusqu'à la côte 0.	157.500	68.200	89.300	1.284.412	573.903	710.509

La troisième hypothèse est donc de beaucoup la plus défavorable ; c'est celle que l'on doit admettre pour le calcul des dimensions à donner aux attaches.

La force Q est équilibrée par la réaction verticale de la crapaudine, qui lui est égale en intensité, et par un couple de deux forces horizontales A, développées en O par la crapaudine et en O′ par le collier. La distance OO′ étant égale à 11^{m},85, la valeur des forces A se détermine par l'équation :

$$A \times OO' = Qa,$$

d'où

$$A = \frac{710.509}{11,85} = 59.958^{kg}.$$

Travail des attaches fixes supérieures. — La partie la plus faible du corps du collier qui relie le pivot supérieur aux ancres du bajoyer, a une section rectangulaire de $2 \times 126 \times 90$, dont la superficie est de 59.958 mètres carrés. L'effet par millimètre carré sur cette section sera ainsi égale à 2^{k},2.

Chacun des deux boulons qui relient le collier aux ancres résiste par deux sections de 120 millimètres de diamètre (11.394^{mq} chacune de section) à la force A. L'effort de cisaillement par millimètre carré est ainsi

égal à $\frac{59.956}{2 \times 11304} = 2^{k},65$ environ, en supposant que toute la charge soit supportée par un seul boulon.

Travail du pivot supérieur. — Le pivot en acier fixé à la traverse supérieure peut être considéré comme une pièce encastrée à une de ses extrémités et soumise à un effort transversal $A = 59.958^{k}$ appliqué au milieu de la hauteur du collier.

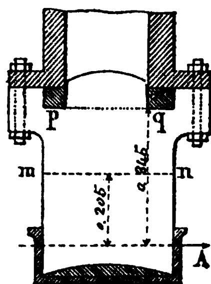
Dans la section *ab*, l'effort maximum R, développé par millimètre carré dans l'acier, est donné par la formule :

$$R = \frac{59.958 \times 190}{\frac{\pi r^3}{4}} = \frac{59.958 \times 190}{\frac{\pi \times 150^3}{4}} = 4^{kg},3.$$

Au-dessous de la section *ab*, la pièce s'élargit et le moment résistant augmente plus vite que le moment fléchissant ; R ne peut donc que diminuer.

Travail du pivot inférieur. — Le pivot inférieur supporte :

1° Le poids du vantail qui est de 89.300 kilogrammes.



Ce poids, réparti sur une section de 125.644 millimètres carrés, conduit à un effort de compression tout à fait insignifiant de $0^k,71$ par millimètre carré.

2° Un effort horizontal A égal à 59.958 kilogrammes que l'on peut considérer comme appliqué au milieu de la hauteur de la crapaudine femelle.

Dans la section *mn*, l'effort maximum R développé par unité de surface, est donné par la formule :

$$R = \frac{59.958 \times 0.205}{\pi' \frac{0.195^3}{4}} = 2^{kg},1 \text{ par millimètre carré.}$$

Dans la section *pq*, l'effort est de même :

$$R = 59.958 \times 0,345 = 20.685, \text{ soit } 4^{kg},13 \text{ par millimètre carré.}$$

On voit donc que le travail de l'acier dans le pivot ne dépassera pas la limite généralement admise. On reconnaît, en outre, que le tenon qui surmonte le pivot suffit pour la transmission des efforts, et que les boulons qui assemblent le pivot avec la pièce qui le surmonte n'auront, en temps ordinaire, aucune fatigue à supporter. Ils n'entrent en jeu que quand un effort étranger, comme le choc d'un navire, tend à arracher la porte de ses attaches, ou encore pour empêcher le pivot de tomber quand on soulève la porte pour la réparer.

Inutilité des roulettes. — En résumé, les attaches de la porte ne fournissent dans l'hypothèse la plus défavo-

rable que de faibles efforts par unité de surface; il est donc inutile, au point de vue des attaches, de munir la porte des roulettes.

Il est facile de reconnaître que les roulettes sont également inutiles au point de vue des déformations possibles du vantail, dans le sens transversal.

L'ensemble du vantail peut être assimilé à une poutre encastrée à une de ses extrémités (la face extérieure du poteau tourillon) et chargée sur sa longueur d'un poids uniformément réparti (la différence entre le poids propre du vantail et la sous-pression). La valeur du poids p, par mètre courant à faire entrer dans le calcul, est donné par l'équation :

$$\frac{1}{2} pl^2 = Qa' = 89.300 \times 7^m,75 = 692.075,$$

a' étant la distance du point d'application de Q à la section d'encastrement considérée.

L'effort maximum auquel est soumis le métal dans cette section est donné par l'équation :

$$R \frac{I}{n} = \frac{1}{2} pl^2 = 692.075,$$

où l'on doit faire :

$$I = 6,254081 \quad \text{et} \quad \frac{I}{n} = 0,946.$$

On en conclut $R = 7^k,315363$ par millimètre carré. La flèche de l'extrémité est d'ailleurs égale à

$$f = \frac{1}{8} \frac{pl^4}{EI} = \frac{692.075 \times \overline{16,89}^2}{4 \times 18.000.000 \times 6,254081} = 0^m,0004.$$

La porte présente donc une roideur très satisfaisante, même dans le cas exceptionnel que nous avons analysé.

N° 58

ETUDE

SUR LA

FABRICATION DES CHAUX HYDRAULIQUES

DANS LE BASSIN DU RHONE

Par M. A. GOBIN, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

INTRODUCTION.

Exposé. — L'industrie des chaux hydrauliques a pris depuis vingt-cinq ans, dans le bassin du Rhône, des développements qui en font aujourd'hui une des branches principales du commerce de la région; en même temps, les procédés de la fabrication se sont perfectionnés et ont amené la préparation, comme produit accessoire de la chaux, d'un excellent ciment à prise lente.

Nous avons eu l'occasion d'employer un grand nombre de ces chaux soit dans les grands travaux que nous avons exécutés pour la défense de Lyon contre les inondations du Rhône, soit comme directeur du service de la voirie municipale de cette ville; nous avons ainsi été conduit à visiter les principales usines qui les fournissent et à étudier les procédés de fabrication afin de mieux juger les qualités des divers produits.

Nous avons pensé qu'il serait peut-être intéressant pour les lecteurs des *Annales* de résumer les notes que

nous avons prises pour notre usage personnel et d'exposer la situation actuelle de cette industrie dans le bassin du Rhône (*). Tel est l'objet de ce mémoire.

Généralités. — A Lyon, on emploie principalement :

1° Les chaux dites du Midi, de couleur blanche, qui proviennent du bas-Rhône (chaux du Teil, chaux de Cruas, *Ardèche;* chaux de l'Homme-d'Armes, *Drôme*, etc.) et dont la chaux de Pavin de Lafarge du Teil représente le type le plus parfait;

2° La chaux du Haut-Rhône (Montalieu) et de Saint-Hilaire-de-Brens, dans le département de l'Isère;

3° Les chaux du Bugey (Virieu, Bons, etc.).

Les usines du Teil ne fabriquent qu'une seule espèce de chaux; celles de Montalieu, de Virieu et de Bons fabriquent à la fois de la chaux dite *légère* et de la chaux dite *lourde;* toutes ces usines fabriquent en même temps, avec les résidus de la fabrication de la chaux, un excellent ciment à prise lente. Pour faire connaître ces divers produits, nous allons décrire le mode de fabrication suivi dans ces usines en commençant par l'usine Pavin de Lafarge, du Teil, qui est la plus ancienne et la plus importante.

CHAPITRE PREMIER.

FABRICATION DE LA CHAUX DU TEIL.

Usine Pavin de Lafarge.

Cette usine est située sur la rive droite du Rhône, à 4 kilomètres au-dessous de la station du Teil. La carrière, qui a un front de 600 mètres de longueur et de

(*) Nous avons complété cette étude après avoir visité de nouveau, dans le courant du mois de mai 1887, les quatre usines que nous décrivons.

120 mètres de hauteur, est ouverte dans le néocomien inférieur (calcaire à criocères). L'extraction des pierres est faite au moyen de mines puissantes; la subdivision des blocs se fait ensuite au moyen de petites mines dites pétards. Enfin, les pierres sont cassées en fragments plats d'un à deux décimètres cubes (*), en évitant autant que possible les grandes inégalités d'épaisseur, afin d'obtenir une cuisson plus uniforme.

Cuisson. — Les fours employés sont de forme ovoïde à cuisson continue; ils sont actuellement au nombre de 42 et ont une capacité qui varie de 45 à 67 mètres cubes. On y brûle de la houille du Gard en petits fragments dans la proportion de 110 kilogrammes de hoüille pour un mètre cube de calcaire cassé pesant 1.250 kilogrammes, soit 9 p. 100 environ. La cuisson dure environ trois jours.

Le défournement ou tirage des fours se fait à plusieurs reprises dans la journée de façon à extraire chaque jour le tiers de la capacité du four. La grille du four est assez élevée pour qu'on puisse placer un wagon au-dessous; en tirant quelques barreaux de la grille, on fait tomber la chaux cuite dans le wagon. L'ouvrier trie les incuits qu'il aperçoit.

Les derniers fours construits sont munis d'une grille spéciale qui permet de les décharger mécaniquement; cette grille augmente le tirage et active la cuisson.

Extinction. — La chaux cuite est transportée sous des hangars où on l'arrose avec des arrosoirs à pomme (eau consommée 1/10 environ du poids de la chaux), puis elle est mise en tas et abandonnée à elle-même. L'extinction se produit immédiatement avec un grand dégagement de chaleur et de vapeur d'eau; la chaux se fend et

(*) Cette forme plate vient de ce que les bancs de la carrière sont stratifiés.

se réduit peu à peu en poudre ; on la laisse ainsi en repos pendant dix ou quinze jours, de manière à obtenir une extinction complète de toutes les parties.

La chaux ainsi éteinte est chargée en brouettes et passée au travers de grilles établies à l'entrée des blutoirs pour en séparer les gros incuits. Dans une partie de l'usine, la chaux soumise à l'extinction est entassée dans des fosses longitudinales au fond desquelles se trouvent, de distance en distance, des grilles à grandes mailles ; pour enlever la chaux, on la fait passer au travers de ces grilles pour la faire tomber dans une gaîne inférieure où passe une chaîne à palettes qui entraîne la chaux vers les blutoirs. Cette chaux, à son entrée dans les blutoirs, est passée sur une nouvelle grille plus fine qui en sépare les incuits. Ces incuits sont le plus souvent rejetés ; on les porte quelquefois dans les fours lorsque le transport en est facile.

Blutages. — La chaux ainsi purgée est soumise à un premier blutage dans un blutoir cylindrique à section polygonale semblable à ceux des moulins et recouvert d'une toile métallique n° 40 (*). L'axe en est un peu incliné afin de pouvoir amener au point le plus bas de l'appareil et recevoir dans un récipient spécial les matières qui ne passent pas au travers de la toile. Pour protéger cette dernière contre les incuits un peu gros que peut encore contenir la chaux éteinte, on place dans l'intérieur du blutoir, près de la toile, une grille formée de tringles en fer placées parallèlement à l'axe de l'appareil et formant ainsi une cage polygonale qui retient les grappiers et incuits et les empêche d'atteindre la toile qu'ils pourraient percer.

La poudre fine recueillie dans ce premier blutage se

(*) Les numéros des toiles métalliques correspondent au nombre de fils contenus dans le pouce linéaire, soit 27 millimètres.

mélange avec celle qui provient des deux blutages dont nous allons parler.

Les parties qui ne traversent pas la toile sont recueillies à l'extrémité du blutoir et constituent des *grappiers* formés de parties blanches non éteintes et de parties noires ou surcuits qu'on soumet à une trituration dans des moulins munis de meules en pierres espacées de deux centimètres environ et faisant 120 tours par minute. Le produit de cette trituration est porté dans un second blutoir semblable au premier, mais entouré d'une toile un peu plus fine, n° 50; la poudre tamisée se mélange à celle du premier blutage. Les grappiers recueillis sont triturés de nouveau dans les mêmes moulins, puis portés dans un troisième blutoir à même toile, n° 50. La poudre fine obtenue se mélange à celle des deux premiers blutages et ce mélange (*) constitue la chaux du Teil du commerce. On la livre aux acheteurs en sacs de 50 kilogrammes. L'usine en produit 800 tonnes par jour en moyenne, soit 200.000 tonnes par an. Elle se vend 12 à 14 francs la tonne à l'usine.

La densité de cette chaux non tassée est de 0,72 environ; elle fait prise sous l'eau en dix-huit heures à la température ordinaire (**).

(*) Ce mélange se fait automatiquement en plaçant les blutoirs dans une même chambre dont le plancher est disposé en trémie pour rassembler toutes les poudres en un même point où elles sont prises par une noria pour être transportées aux halles d'ensachage. Dans une même chambre se trouvent 4 blutoirs, savoir : 2 blutoirs à toile n° 40 dont les grappiers alimentent successivement 2 blutoirs à toile n° 50.

(**) Nous avons fait quelques expériences sur la densité de la chaux du Teil prise dans un de nos chantiers. Vidée du sac dans un récipient, elle avait une densité de 0,78 un peu supérieure à celle que nous venons d'indiquer. En secouant et en frappant pendant un certain temps le récipient qui la contenait, nous avons obtenu une densité de 1,00 presque aussi considérable que celle qui résulte du tassement direct au pilon et qui n'est que de 1,02. Ces faits montrent que la densité de cette chaux est très variable suivant les circonstances, ce qui justifie l'usage des dosages au poids qui sont, du reste,

Les grappiers dits grappiers-sable provenant du dernier blutage étaient autrefois rejetés. Un employé de l'usine eut l'idée de les pulvériser et d'en faire un mortier maigre qui, comprimé à la presse hydraulique, donnait des carreaux dont la texture se rapprochait beaucoup de celle de certains calcaires naturels compactes. Plus tard, vers 1869, à la suite de divers essais et analyses, M. Pavin de Lafarge trouva le moyen d'en tirer un très bon ciment à prise lente dit : *ciment Portland-Lafarge du Teil*. Voici comment se fabrique ce ciment.

Ciment Portland-Lafarge du Teil.

Les grappiers formant le résidu de la fabrication de la chaux sont placés sous des hangars couverts où, pendant un mois, ils se délitent à l'air. La poudre qui se forme dans cette extinction spontanée est séparée des grappiers au moyen d'un blutage ; c'est encore de la chaux hydraulique qu'on mélangeait autrefois à celle des trois premiers blutages dont il vient d'être question, mais qui est maintenant mise de côté pour être soumise à divers essais et à un emploi spécial.

La proportion de poudre est de 9 à 10 p. 100 du poids des grappiers.

---

beaucoup plus commodes et plus faciles à surveiller, par suite de la livraison de la chaux en sacs de 50 kilogrammes.

Pour être réduite en pâte ferme, cette même chaux absorbe un peu plus de la moitié de son poids d'eau, soit 442 d'eau pour 780 de chaux. Le volume de la pâte n'est que les 865 millièmes de celui de la chaux en poudre non tassée telle qu'on l'obtient en la vidant des sacs dans le récipient. Pour obtenir 1 mètre cube de pâte ferme, il faut donc environ 902 kilogrammes de chaux. Avec les sables ordinaires qui, le plus souvent, ne présentent en vides que le tiers de leur volume au degré de tassement où ils se trouvent dans les mortiers, on peut donc abaisser le dosage jusqu'à 300 kilogrammes de chaux par mètre cube de sable, sans cesser de remplir les vides du sable par de la chaux en pâte. Pour les mortiers destinés à être immergés, la quantité de chaux doit être augmentée et portée à 350 kilogrammes. On peut faire des mortiers maigres avec des doses inférieures à 300 kilogrammes par mètre cube de sable.

Les grappiers ainsi purgés sont triturés dans des moulins avec meules en pierre très rapprochées et le produit est porté dans un premier blutoir à toile métallique n° 80. La poudre obtenue se mélange à celle du second blutage dont nous allons parler.

Les grappiers recueillis dans ce premier blutage sont broyés une seconde fois dans les moulins et le produit de cette trituration est porté dans un second blutoir à toile n° 100 (*). La poudre obtenue se mélange à celle du premier blutage et à celle du blutage de la sablette dont nous allons parler.

Les résidus du précédent blutage forment une espèce de sable fin dit *sablette* qui représente 16 à 17 p. 100 du grappier-sable. Cette sablette est triturée très finement dans des broyeurs spéciaux en fonte dits *meuletons* (**), puis on la porte dans un blutoir à toile n° 150. Le poudre tamisée constitue un ciment noir qu'on place en silos pendant 40 jours, puis qu'on verse dans la fabrication des deux premières poudres. Ce mélange des trois poudres constitue un ciment gris qu'on laisse reposer encore dans des silos et qu'on vend sous le nom de *Portland-Lafarge du Teil*. Ce ciment non tassé a une densité de 1,10 environ; il fait prise au bout de plusieurs heures et se vend 30 à 40 francs la tonne à l'usine.

La production du ciment est d'environ 1/10 de celle de la chaux.

(*) On va mettre la toile n° 100 à tous les blutoirs à toile n° 80. Il en résultera évidemment une augmentation de la finesse et par suite de la qualité du ciment.

(**) Il ne faut pas confondre ces meuletons avec l'antique molleton à auge circulaire. Le meuleton se compose d'un cylindre en fonte à axe horizontal animé d'un mouvement circulaire rapide autour de son axe et d'un petit mouvement alternatif dans le sens de l'axe. Le cylindre repose sur une table en fonte épousant la partie inférieure de son contour; l'écrasement se fait par le poids du cylindre; celui-ci est armé de cannelures qui entraînent et agitent constamment la matière à broyer.

Le résidu du blutage de la poudre de sablette est reporté dans les meuletons.

Ciment blanc. — Il arrive quelquefois que le grappier formant le résidu du blutage de la chaux contient une plus grande proportion de non éteints que dans la production courante ; ce grappier, dit *grappier blanc*, est mis à part pour être traité comme nous venons de le dire pour les grappiers-sable ordinaires ; le ciment obtenu dans les deux premiers blutages à toile n°s 80 et 100 est plus blanc et moins lourd que l'autre ; on ne le mélange plus au ciment noir de sablette et on le vend aux fabricants de carreaux comprimés sous le nom de *ciment-blanc*. Il ne forme, du reste, que le quart de la production totale du ciment.

Vérifications et essais. — Un contre-maître suit en permanence le travail de la bluterie de chaux ; il prend des échantillons de poudre dans les divers blutoirs et les tamise sur place dans un tamis à toile n° 40, afin de s'assurer qu'il ne s'y trouve pas de grappiers. S'il en était autrement, il serait ainsi averti que la toile du blutoir correspondant est percée et on ferait immédiatement la réparation nécessaire.

Dans un laboratoire spécial, on fait également en permanence des essais de résistance par traction des chaux et ciments fabriqués, afin de s'assurer de la parfaite homogénéité des produits. Ces essais sont faits au moyen de l'appareil Michaëlis ; ils sont tous inscrits sur un registre avec tous les détails de l'opération.

Cette surveillance incessante permet d'obtenir des produits toujours semblables et d'éviter tout mécompte dans leur emploi.

Ensilage. — La chaux fabriquée est ensachée dans des sacs plombés pesant, net, 50 kilogrammes, qui sont livrés

à la consommation. Le ciment est, au contraire, emmagasiné dans des silos où on le laisse séjourner un mois ou deux avant de l'expédier. On sait, en effet, qu'il y a avantage à laisser reposer quelque temps les ciments et que leur emploi, immédiatement après la fabrication, peut, pour certains ciments, donner lieu à des mécomptes. Cette pratique de l'ensilage serait bonne également, mais avec des délais moindres, pour toute chaux où entre le produit d'une trituration. Le temps exigé pour la livraison de la chaux, le transport dans les entrepôts et l'emploi sur les chantiers, suffit généralement pour obtenir un repos équivalent à l'ensilage ; mais s'il en était autrement, il y aurait lieu, à notre avis, de différer l'emploi d'une chaux de fabrication trop récente.

CHAPITRE II.

CHAUX DU HAUT RHONE.

Usines de Montalieu et de Bouvesse (Isère).

Généralités. — L'usine de Montalieu, située sur la rive gauche du Rhône, à 70 kilomètres environ au-dessus de Lyon, ne fabriquait autrefois qu'une seule espèce de chaux en blutant la poudre provenant de l'extinction de la chaux cuite. Depuis 1870, on utilise les déchets de ce premier blutage pour faire, comme à Virieu, une seconde espèce de chaux dite *chaux lourde*, le nom de *chaux légère* étant réservé au produit primitif. Enfin, avec les déchets de la fabrication de la chaux lourde, on fabrique, comme au Teil, un très bon ciment à prise lente. Cette usine possède actuellement 19 fours.

Une seconde usine dite de *Bouvesse*, comprenant 10 fours, a été établie, il y a quelques années, à 300 mètres en amont de celle de Montalieu ; ces deux usines, alimen-

tées par le même gisement de calcaire argileux (oxfordien), sont aujourd'hui réunies sous la même direction et ne forment qu'une seule exploitation commerciale ; elles sont desservies par le Rhône et par un embranchement de chemin de fer.

Ces usines ont produit, en 1886, 32.000 tonnes de produits, savoir :

22.000 tonnes de chaux légère ;
6.000 tonnes de chaux lourde ;
4.000 tonnes de ciment Portland.

Cette production pourrait être facilement augmentée.

Les usines comprennent 29 fours de forme ovoïde ayant 8 mètres de hauteur et 3 mètres de diamètre au milieu. Le renflement est peu prononcé et la forme générale se rapproche de celle d'un cylindre, afin de faciliter la descente des matières et éviter le coïncement qui produit des agglomérations appelées loups.

Cuisson. — Le calcaire argileux, cassé en fragments plus ou moins gros, est chargé dans les fours avec des couches alternatives d'anthracite de Communay ou de La Mure (Isère), auquel on a mélangé une petite proportion de poussière de coke, qui active la combustion. Ces matières sont dosées au moyen de brouettes. Le calcaire décrépite généralement sous l'action de la chaleur, par suite de la vaporisation de l'eau de carrière qu'il contient. Si le calcaire a perdu cette eau avant d'être mis dans le four, il ne décrépite plus ; on mouille alors un peu le combustible, la vapeur d'eau facilitant la décomposition du calcaire (*). On consomme de 150 à 160 kilogrammes de combustible par tonne de produit.

(*) M. Debray a reconnu que la présence de l'acide carbonique formé pendant la décomposition du carbonate de chaux par la chaleur gênait la décomposition et pouvait même l'arrêter tout à fait si la pression du gaz formé était de 85 millimètres de mercure. En absorbant l'acide carbonique à mesure qu'il

Les fours sont revêtus intérieurement en briques réfractaires sur la moitié supérieure où se fait le coup de feu, et en moellons de talcschistes de Saint-Michel (Haute-Savoie) dans la moitié inférieure. Ces moellons, grossièrement taillés, ne coûtent que le tiers du prix des briques et durent au moins aussi longtemps. On a remarqué que les moellons de talcschistes qu'on prenait autrefois dans le lit du torrent de Saint-Michel, duraient beaucoup plus longtemps que ceux qu'on prend maintenant en carrière par suite de l'épuisement de ce premier gisement.

La cuisson dure de 80 à 86 heures ; on défourne la chaux par portions de 6 tonnes environ et à trois ou quatre reprises par jour. Le chaufournier dirige le chargement du four en se guidant sur la température des gaz qui se dégagent de l'orifice. A mesure qu'on charge la chaux cuite dans les brouettes, on fait un premier triage des incuits.

Extinction. — Ces brouettes contenant la chaux sont conduites sous un hangar où on les vide ; chaque brouettée, contenant environ 100 kilogrammes de chaux, forme un petit tas qu'on arrose avec 10 litres d'eau contenus dans un arrosoir à pomme ; la chaux, ainsi mouillée, est mise en tas sous le hangar et abandonnée à elle-même. L'extinction sèche s'opère d'abord très activement, puis elle se ralentit et, au bout de 15 à 20 jours, elle est complète. On passe alors la chaux éteinte en poudre au travers d'une grille formée de barreaux ronds, en fer, de la grosseur du doigt, espacés tant plein que vide. On en sépare ainsi de gros fragments qui contiennent les incuits,

se produit, la décomposition continue et peut être constante. Ainsi s'explique la vieille pratique des chaufourniers qui jettent de l'eau dans le four de façon à enlever l'acide carbonique au moyen d'un courant de vapeur et à déterminer ainsi une nouvelle décomposition du calcaire.

les frittes ou surcuits et les morceaux non éteints. La poudre tombe dans le blutoir. Ce qui reste sur la grille comprend :

1° Les incuits qui se reconnaissent facilement à leur forme et à leur couleur de pierre naturelle ; on les trie à la main et on les rejette. Ils sont, du reste, en très petite quantité ;

2° Les frittes ou surcuits qui sont des fragments de calcaire ayant subi la fusion pâteuse par suite d'un excès de cuisson qui les transforme en ciment à prise lente ;

3° Les non éteints, qui sont des fragments légers, suffisamment cuits, mais ayant résisté à l'extinction.

Après le triage des incuits, il reste les surcuits et les non-éteints qu'on porte dans un concasseur à mâchoires pour les pulvériser.

Le produit de la pulvérisation est bluté et la poudre obtenue est portée sur la grille qui reçoit la poudre d'extinction avec laquelle elle se mélange intimement dans le blutoir.

Chaux légère. — Le blutoir placé sous la grille où se fait le premier purgeage de la poudre d'extinction reçoit donc à la fois cette poudre d'extinction et la poudre provenant du tamisage des surcuits et non-éteints écrasés. Le but de ce mélange est d'obtenir une chaux de densité convenable, la première poudre donnant une chaux trop légère. Ce blutoir est de forme polygonale à toile métallique n° 40, semblable à ceux employés au Teil. Pour protéger la toile contre l'action des petits incuits et fragments de frittes que la poudre soumise au blutage contient encore, on garnit intérieurement ce blutoir d'une grille formée de tringles en fer de 0m,012 de diamètre, placées parallèlement à l'axe de l'appareil et espacées de 0m,005.

La poudre provenant de ce blutage constitue la *chaux*

légère. Cette chaux, non tassée, pèse 665 kilogrammes le mètre cube; tassée, elle pèse 745 kilogrammes environ. Elle constitue le produit dominant de l'usine. Elle fait prise sous l'eau dans un délai de 40 à 48 heures, suivant la température, et se vend 15 francs la tonne à l'usine.

Chaux lourde. — Les deux blutages dont nous venons de parler et dont le produit définitif constitue la chaux légère, donnent pour résidus des gruaux plus ou moins gros qui sont broyés ensemble dans des moulins ordinaires, puis tamisés dans un blutoir à toile métallique n° 50. La poudre obtenue dans ce blutage constitue la *chaux lourde;* elle pèse 1.075 kilogrammes par mètre cube, non tassée, et 1.265 kilogrammes lorsqu'elle est tassée.

C'est un produit intermédiaire entre le ciment et la chaux légère et qui fait prise beaucoup plus rapidement que cette dernière (15 à 20 heures). Elle peut remplacer le ciment à prise lente dans beaucoup de circonstances; elle se vend 22 francs la tonne à l'usine. On ne la livre qu'après l'avoir laissée pendant trois mois au moins dans des silos où les parcelles qui auraient pu échapper à l'extinction se réduisent en poudre. Ce n'est qu'après ce long repos qu'on procède à l'ensachage et qu'on est sûr d'avoir une poudre bien homogène.

Ciment Portland du Haut-Rhône.

Les grappiers recueillis dans le blutage qui produit la chaux lourde constituent un sable moyen, de couleur gris foncé, qu'on expose sous des hangars à l'action de l'air extérieur plus ou moins humide, comme on le fait au Teil. Les parties blanches qu'il contient continuent à s'éteindre spontanément. Au bout d'un temps assez long et qui est toujours d'un mois au moins, on reprend ce sable qu'on

blute, pour le purger de la poudre de chaux qui a été produite par ce délitement spontané, poudre qui est portée sur le tas de chaux soumise à l'extinction. Ce sable ainsi purifié est broyé dans des moulins ordinaires animés d'une vitesse de 100 tours au moins par minute (diamètre $1^{m},50$), puis le produit pulvérisé est bluté dans des blutoirs avec toile métallique n° 70. Les grappiers provenant de ce blutage sont conduits dans les moulins où ils se mélangent aux grappiers primitifs. Le déchet est donc nul.

On obtient ainsi le *ciment Portland du Haut-Rhône* qui pèse, non tassé, 1.335 kilogrammes par mètre cube. Ce ciment est placé dans des silos où on le laisse reposer pendant trois mois au moins avant de l'ensacher. Il se vend 45 francs la tonne à l'usine et fait prise dans un délai de 8 à 12 heures suivant la température.

CHAPITRE III.

CHAUX DU BUGEY.

Ces chaux proviennent principalement des importantes usines de Virieu-le-Grand (Ain), sur la ligne de Lyon à Genève, et de Bons, près de Belley (Ain).

Usine Delastre.

A Virieu, la fabrication de la chaux se fait de la même manière qu'à Montalieu, avec quelques simplifications. La chaux légère est produite exclusivement par le blutage de la chaux éteinte, préalablement débarrassée de ses incuits, surcuits et non-éteints, par le passage au travers d'une grille (*); elle pèse, non tassée, 730 kilogrammes

(*) On se sert exclusivement du coke comme combustible; la cuisson dure environ deux jours.

le mètre cube et fait prise en 12 ou 15 heures; elle se vend de 12 à 14 francs la tonne à l'usine.

Les incuits sont triés et reportés dans les fours; les surcuits et non éteints qui restent sur la grille sont mélangés aux gruaux formant le résidu du blutage de la chaux légère; puis, après les avoir humectés par un arrosage très léger pour compléter l'extinction des non-éteints, on porte le tout dans un molleton.

Les matières pulvérisées dans le molleton sont ensuite blutées dans un blutoir à toile métallique n° 50; la poudre obtenue ainsi constitue la chaux lourde qui se vend de 18 à 20 francs la tonne à l'usine; cette chaux, non tassée, pèse 1.000 kilogrammes par mètre cube et fait prise en 10 ou 12 heures.

Les grappiers formant le résidu de ce dernier blutage constituent un gros sable qui sert à fabriquer le ciment Portland comme on le fait à Montalieu. Seulement, comme ces grappiers ne contiennent plus de parties blanches, on ne les fait pas déliter à l'air et on les soumet directement à la mouture pour obtenir le ciment Portland n° 1, dit de Clairefontaine, à prise lente.

Ce ciment, non tassé, pèse 1.300 kilogrammes le mètre cube et se vend de 35 à 40 francs la tonne à l'usine; il fait prise en 6 ou 12 heures suivant la température.

La chaux lourde et le ciment sont placés dans des silos où ils restent en repos pendant plusieurs mois. Lorsqu'on les retire des silos pour les ensacher et les livrer au commerce, on les blute une dernière fois dans un blutoir, appelé *vérificateur*, pour en séparer les impuretés qui pourraient s'y trouver accidentellement et pour donner plus d'homogénéité à la matière.

Chaux mixte. — A l'usine Delastre, on fabrique aussi, sur la demande des ingénieurs, une chaux mixte intermédiaire entre la chaux légère et la chaux lourde. Pour

l'obtenir, on porte directement sous le molleton le produit de l'extinction, après en avoir trié les incuits; le produit de cette trituration est bluté à la toile n° 50 et la chaux obtenue, qui comprend la poudre d'extinction et la poudre provenant de l'écrasement des non-éteints, constitue une *chaux tout-venant ou mixte* semblable à celle qu'on obtiendrait en mélangeant la chaux légère à la chaux lourde. On l'appelle *chaux de Clairefontaine;* elle pèse, non tassée, 825 kilogrammes le mètre cube et fait prise dans un délai de 11 à 13 heures; on la vend de 13 à 15 francs la tonne à l'usine.

On abandonne maintenant la fabrication de la chaux légère pour ne produire que cette seule espèce de chaux mixte qu'on laisse reposer pendant quelques temps en silos.

Ciments. — Les grappiers provenant du blutage de la chaux mixte constituent un très gros sable formé de fragments blancs (*parties non éteintes*) et de fragments noirs (*frittes* ou *surcuits*); ils servent à faire le ciment. Voici comment on procède :

Ciment n° 2. — Les grappiers sont humectés très légèrement et abandonnés pendant quelques jours sous des hangars; puis on les porte dans des molletons (*) où les parties blanches plus tendres se pulvérisent en plus grande proportion que les parties noires qui sont plus

(*) Ces molletons à auge circulaire en fonte sont munis de trois roues verticales en fonte, revêtues d'un cercle en acier légèrement tronconique, et disposées en retraite les unes sur les autres, de façon à rouler sur trois bandes annulaires d'un diamètre de plus en plus grand, et prises sur le fond de l'auge. La première roue éloigne du centre de l'auge les matières qu'elle écrase et les pousse sur la zone de roulement de la seconde roue. Après le passage de cette seconde roue, elles sont de même poussées sur le passage de la troisième roue. Après un tour complet de l'axe vertical conduisant les trois roues, les matières ont été écrasées trois fois et sont poussées par un racloir sur une dernière zone plus excentrique où se trouve un orifice d'évacuation. Les matières à broyer sont jetées à la pelle vers le centre de l'auge.

Ces molletons exigent beaucoup moins de force que les moulins ordinaires à meules horizontales et pulvérisent aussi bien les grappiers.

dures. Les matières triturées sont blutées à la toile n° 60 et la poudre obtenue constitue le *ciment n°* 2 de Clairefontaine. On le laisse trois mois au moins en silos avant de le livrer au commerce.

Ce ciment a une couleur grise; il pèse, non tassé, environ 1.100 kilogrammes le mètre cube; il fait prise en 6 et 12 heures suivant la température; on le vend de 25 à 30 francs la tonne à l'usine.

Ciment n° 1. — Les grappiers formant les rebuts du blutage précédent sont composés presque exclusivement de grains noirs; ils ont l'apparence d'un sable ordinaire grenu. On les dépose pendant quelques jours sous des hangars couverts où on les reprend pour les broyer dans un second molleton à meules plus lourdes afin d'écraser plus complètement les matières. Le produit de la trituration est porté dans un blutoir à toile n° 80 et la poudre obtenue constitue le *ciment n°* 1 *de Clairefontaine*. On le laisse pendant six mois au moins en silos avant de le livrer à la consommation.

Ce ciment est gris foncé; non tassé, il pèse 1.300 kilogrammes le mètre cube et fait prise dans un délai de 6 à 12 heures, suivant la température; il donne des mortiers plus résistants encore que le ciment n° 2. Son prix est de 35 à 40 francs à l'usine.

Carrières. Production. — Les carrières exploitées à Virieu appartiennent, comme celles de Montalieu, à l'étage oxfordien. Elles sont, comme au Teil, à côté des fours.

L'usine Delastre produit annuellement 30.000 tonnes se répartissant de la manière suivante, selon qu'on fabrique deux espèces de chaux ou une seule.

Cas de deux chaux.		*Cas d'une seule chaux mixte.*	
Chaux légère	50 p. 100	Chaux de Clairefontaine. .	65 p. 100
— lourde	38 —	Ciment Portland n° 2 . . .	25 —
Portland n° 1	12 —	— — n° 1 . . .	10 —

CHAUX DE BONS.

Usine Trolliet.

Généralités. — L'usine de Bons, située près de la station de Chazey-Bons, sur la ligne de Virieu à Belley, a été construite, en 1880, d'après un plan d'ensemble parfaitement conçu où l'on a introduit tous les perfectionnements réalisés à cette époque dans la fabrication des chaux hydrauliques. Les constructions sont adossées au coteau à la partie supérieure duquel se trouvent les carrières desservies par un chemin de fer à voie étroite de 1.400 mètres de longueur et à pente continue, ce qui permet de descendre les wagons par la seule action de la gravité ; les fours dominent l'usine, et la chaux cuite n'a qu'à suivre l'action de la pesanteur pour passer dans les appareils où elle subit les manipulations successives auxquelles elle est soumise dans les divers étages de l'établissement. Enfin, un grand perfectionnement a été introduit dans la fabrication par la substitution d'un nouveau système de blutage dit *par ventilation* (système Trolliet, breveté s. g. d. g.), aux blutoirs à toile métallique employés jusqu'ici dans la fabrication des chaux lourdes et ciments ; nous le décrirons plus loin.

Pierre. Cuisson. — Le calcaire argileux, de couleur bleue, appartient au terrain oxfordien ; il paraît identique à celui qui est exploité à Virieu par l'usine Pochet et se rapproche beaucoup, comme aspect, de celui de Montalieu.

La pierre est cassée en fragments d'un décimètre cube environ et cuite dans six fours ovoïdes à cuisson continue de 13 mètres de hauteur et de 60 mètres cubes environ de capacité ; la bouche des fours est fermée par un chapeau en tôle et le tirage se fait au moyen de car-

naux partant de la partie supérieure du four et aboutissant à une cheminée dont on peut régler le tirage au moyen de registres. Le combustible se compose d'un mélange de houille et d'anthracite; on le mouille préalablement et on le dose en comptant les pelletées; la consommation est en moyenne de 160 kilogrammes par tonne de produit. La cuisson dure quatre jours et demi, soit cent heures.

Produits de l'usine.

L'usine fabrique de la chaux légère, de la chaux lourde et du ciment à prise lente. La production, en 1886, a été de 18.000 tonnes se répartissant, par portions égales, entre les trois produits ci-dessus. La proportion du ciment peut être augmentée à volonté en augmentant la quantité de charbon et le tirage de manière à porter la température à 1.400° au lieu de 1.000 et 1.100°, ce qui augmente la proportion des frittes au détriment de la quantité de chaux; la durée de la cuisson reste la même.

Chaux légère. — On défourne à l'aiguille, comme au Teil, et on charge la chaux en fragments dans des brouettes d'une capacité de 200 litres; on trie en même temps les incuits qu'on fait cuire de nouveau.

La chaux portée sous un hangar est éteinte par aspersion (14 *litres par brouettée de* 200 *litres*) et mise en tas. Au bout de deux jours, l'extinction est complète; la chaux est reprise et passée au travers d'une grille en fer à barreaux plats espacés de 1 centimètre; les frittes et non-éteints restent sur la grille (*s'il s'y trouve des incuits, on les trie*) et on les repousse avec des raclettes. La poudre tombe dans des blutoirs à toile n° 40 et le produit tamisé constitue la *chaux légère*. Non tassée, elle pèse 600 à 650 kilogrammes le mètre cube et fait prise dans un délai de 24 à 30 heures; elle se vend 10 à 13 francs la tonne à l'usine.

Chaux lourde. — Les grappiers formant le résidu de ce premier blutage sont réunis à ceux qui n'ont pas passé dans la grille ci-dessus et sont triturés dans des molletons en fonte à roues verticales pesant mille kilogrammes, semblables à ceux du Virieu. Le produit de la trituration est porté dans les *blutoirs à ventilation.* Voici comment se pratique ce blutage qui donne d'excellents résultats.

Blutage par ventilation. — Les matières pulvérisées sont amenées, au moyen d'un tube, à l'extrémité d'un cylindre en tôle de $1^m,50$ de longueur et de $0^m,55$ de diamètre dont l'axe est légèrement incliné sur l'horizontale ($0^m,20$ pour 1 mètre); ce cylindre tourne autour de son axe et de petites ailettes, fixées à sa paroi intérieure suivant des génératriees, ramènent constamment à la partie supérieure les matières pulvérisées qui retombent ensuite en lames minces vers la génératrice inférieure, en traversant le cylindre suivant un diamètre. Dans ce mouvement, les parties les plus fines sont entraînées par un courant d'air qui traverse le cylindre dans le sens de son axe, en entrant par la partie la plus basse et en sortant par la partie haute qui débouche dans une *chambre de dépôt* où les poudres tombent par leur propre poids, par suite de l'épanouissement du courant d'air et de la grande diminution de sa vitesse. Environ les 9/10 de la poudre blutée tombent près du débouché du cylindre, le reste se dépose plus loin; mais le tout est réuni en un seul point par suite de la disposition du plancher en forme de trémie. Les matières à bluter sont amenées vers l'extrémité la plus haute du cylindre; les parties non entraînées par le courant d'air qu'elles traversent environ vingt fois, arrivent peu à peu vers l'extrémité inférieure qui les évacue dans une trémie où une chaine à godets les reprend pour les porter au hangar de dépôt.

Le courant d'air est obtenu au moyen d'une aspiration établie à l'extrémité de la chambre de dépôt par le tirage de la cheminée et par l'action d'un petit ventilateur; l'air aspiré passe d'abord par le cylindre bluteur qui est la seule ouverture de communication entre la chambre et l'extérieur, puis il s'épanouit dans la chambre de dépôt. En réglant convenablement le courant d'air au moyen d'un registre placé à l'entrée du cylindre (*), il est facile d'obtenir une poudre blutée dont les parties les plus grosses passent dans une toile de numéro donné. Ce réglage une fois fait, le blutage se continue automatiquement avec la régularité la plus parfaite. Un petit regard placé en face du débouché du cylindre permet, du reste, de recevoir sur une petite pelle la poudre blutée et de vérifier sa finesse au moyen du tamis d'épreuve.

Ce système présente de nombreux avantages que nous allons énumérer :

1° Il supprime l'emploi des toiles métalliques qu'il faut réparer fréquemment et renouveler souvent; de là des pertes de temps, des irrégularités de finesse, des passages de gruaux avec la poudre et des frais considérables;

2° Il exige une force motrice beaucoup plus faible que celle des blutoirs ordinaires et n'entraîne que des frais d'installation peu importants;

3° Il supprime absolument toutes les poussières dans l'usine, puisqu'il y a aspiration de l'air par l'appareil; de là commodité pour les ouvriers et réduction de l'usure des organes des machines, paliers, axes, etc.;

4° Il permet de changer à volonté le degré de finesse de la poudre blutée, sans arrêter l'appareil, par un simple

(*) La dépression produite dans la chambre de dépôt par l'aspiration se mesure facilement au moyen d'un tube en U, en verre, en communication, d'un côté, avec cette chambre, et de l'autre, avec l'air extérieur. L'index d'eau colorée en rouge, indiquait 3 millimètres de dépression le jour de notre visite.

réglage du courant d'air; au besoin, on pourrait classer les poudres par ordre de finesse en disposant convenablement le plancher de la chambre de dépôt;

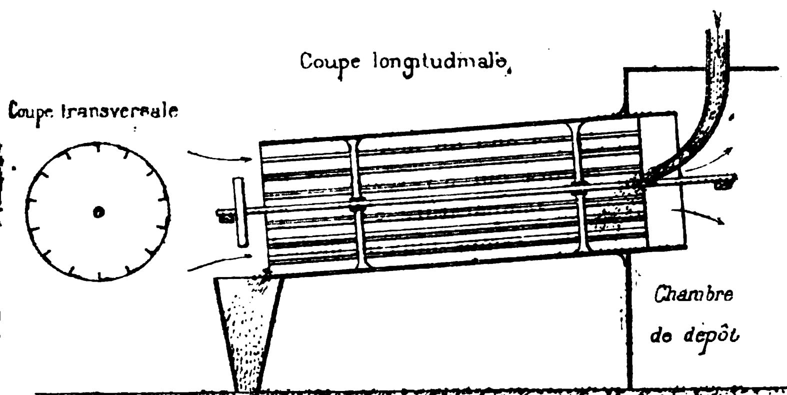
5° Il permet de bluter des matières incomplètement sèches, ce qui est impossible avec les toiles métalliques;

6° Il fonctionne d'une manière continue, régulière, sans usure appréciable et sans nettoyage;

7° Enfin, il donne une régularité absolue de mouture.

A ce dernier point de vue surtout, son emploi dans la fabrication des chaux lourdes et ciments présente de grands avantages, car il permet d'éliminer complètement d'une poudre toutes les parties qui ne passeraient pas dans une toile de 900 mailles par centimètre carré (*) et qui sont à peu près inertes. La proportion des parties actives contenues dans un ciment qui satisfera à cette condition sera donc sensiblement augmentée et sa valeur intrinsèque sera plus grande.

Nous donnons ci-après le croquis de l'appareil.



Ensilage. — La poudre blutée ainsi à l'usine Trolliet et

(*) Ce nombre de mailles correspond à la toile n° 81. En effet, il est donné par $\sqrt{900} = 30$ fils au centimètre linéaire, ou par $30 \times 2,7 = 81$ fils au pouce linéaire, le pouce ayant une longueur de $2^{cm},7$.

qui constitue la chaux lourde de Bons, tombe dans une grande trémie qui débouche au rez-de-chaussée où se fait un ensachage provisoire. Les sacs sont chargés en wagon et transportés au moyen d'un petit chemin de fer à pente continue à la partie supérieure des silos où on les vide. Ces silos, établis près de la gare de Chazey-Bons, ont une grande étendue ; le plancher supérieur est mobile pour faciliter le remplissage ; le sol inférieur est au niveau des voies du chemin de fer de Paris-Lyon-Méditerranée qui y aboutissent. On inscrit sur des ardoise la date du commencement et de la fin du remplissage d'un silos, et lorsque la chaux y a séjourné au moins trois mois, on l'ensache définitivement pour la livrer au commerce en sacs de 50 kilogrammes, poids net. Les sacs sont plombés lorsqu'on le demande.

Cette chaux pèse, non tassée, 1.000 kilogrammes le mètre cube ; elle fait prise dans un délai de 24 heures environ ; elle se vend de 17 à 20 francs la tonne.

*Ciment **Portland de Bons**.* — Les gruaux formant le résidu du blutage de la chaux lourde sont portés sous un hangar où on les humecte d'abord très légèrement, puis on les met en tas afin de faciliter l'extinction des fragments non-éteints qui s'y trouvent encore. La masse s'échauffe et sa température s'élève quelquefois jusqu'à 66°. Au bout d'un temps plus ou moins long, on reprend ces grappiers et on les porte dans un molleton semblable à celui qui prépare les matières de la chaux lourde, mais dont les meules pèsent 1.500 kilogrammes chacune, afin d'écraser plus complètement les frittes. On blute par ventilation la matière écrasée en réglant le courant d'air de manière à tenir une poudre qui passe entièrement dans la toile n° 70. Le cylindre bluteur a un diamètre de $0^{m},45$ pour obtenir un courant d'air un peu plus énergique, la matière étant plus lourde. Sur nos indications,

on a diminué un peu le tirage pour avoir une poudre qui passe dans la toile type n° 80.

On a ainsi le ciment Portland de Bons, qui pèse, non tassé, 1.250 à 1.300 kilogrammes le mètre cube et qui fait prise dans le même délai que la chaux lourde; seulement il donne des mortiers beaucoup plus tenaces. On le vend de 30 à 33 francs la tonne. On le laisse trois mois au moins en silos.

Observations faites dans les silos. — Sur nos indications, M. Trolliet a organisé des observations thermométriques pour suivre les variations de température des chaux lourdes et ciments mis en silos et rechercher s'il ne se produit pas dans la masse, comme nous le supposons, un petit échauffement qui indiquerait qu'il y a encore une continuation d'extinction. Nous rendrons compte du résultat de ces recherches.

Chaux mixte ou tout-venant. — Enfin, sur la demande de quelques ingénieurs, on fabrique aussi, mais en petite quantité, une chaux mixte ou tout-venant, pesant 800 à 850 kilogrammes le mètre cube, en mélangeant dans des proportions convenables de la chaux légère et de la chaux lourde, soit en faisant cette chaux directement par trituration et blutage du produit de l'extinction, comme à Virieu.

Nous avons cru devoir donner quelques détails sur cette usine à cause des perfectionnements qui y ont été introduits. M. Trolliet se propose de les compléter l'hiver prochain en installant le blutage par ventilation pour la chaux légère qui exige une chambre de dépôt beaucoup plus vaste à cause de la légèreté de la poudre. La tendance du directeur de l'usine est, du reste, de réduire de plus en plus la production de chaux légère en forçant la cuisson pour ne faire que de la chaux lourde et du ciment à prise lente.

CHAPITRE IV.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Il nous a paru intéressant de résumer dans un tableau les quantités relatives des divers produits des quatre usines que nous avons spécialement étudiées, ainsi que les densités des produits correspondants. Bien que ces densités ne soient pas rigoureusement comparables, parce qu'elles ont été déterminées par divers expérimentateurs qui n'ont pas vraisemblablement opéré dans des conditions identiques, nous pensons cependant qu'on peut en déduire quelques comparaisons intéressantes.

Tableau des quantités relatives des divers produits des quatre usines.

USINES	CHAUX mixte		CHAUX légère		CHAUX lourde		CIMENT n° 2		CIMENT n° 1		PRODUCTION totale annuelle en tonnes
	Proportion p. 100	Densité	Proportion p. 100	Densité	Proportion p. 100	Densité	Proportion p. 100	Densité	Proportion p. 100	Densité	
Le Teil.	91	0,720	»	»	»	»	2,5	1,00	7,5	1,100	220.000
Montalieu . . .	»	»	68,7	0,665	18,8	1,075	»	»	12,5	1,335	32.000
Virieu	»	»	50,0	0,730	38,0	1,000	»	»	12,0	1,300	30.000
—	65	0,825	»	»	»	»	25,0	1,10	10.0	1,300	
Bons.	»	»	33,3	0,625	33,3	1,000	»	»	33,3	1,275	18.000
—	»	0,825									

OBSERVATIONS

Nous appelons ciment n° 2 du Teil le ciment blanc.
Les densités ne sont données qu'approximativement.

On voit que l'usine du Teil fabrique principalement de la chaux et peu de ciment et que ce dernier a une densité qui dépasse peu celle de la chaux lourde des autres usines; la chaux mixte du Teil est, de même, moins dense que la chaux mixte de Virieu et de Bons. On peut

donc dire que les produits de cette usine sont relativement légers.

On pourrait, si on le voulait, augmenter la densité de la chaux en remplaçant les moulins par des molletons qui écraseraient plus complètement les parties blanches des grappiers et supprimeraient la fabrication du ciment blanc; on augmenterait aussi la densité du ciment gris et, vraisemblablement, sa résistance à la traction.

Les ciments de Montalieu, de Bons et n° 1 de Virieu ont à peu près la même densité. L'usine de Montalieu produit la même proportion de ciment et plus de chaux légère que celle de Virieu, avec une densité un peu moindre pour la chaux.

Virieu produit une forte proportion de chaux lourde. Lorsque cette usine fabrique de la chaux mixte, la proportion de ciment (n° 1 et n° 2 réunis) augmente considérablement et atteint 35 p. 100 du produit total. C'est ce qui explique la tendance de cette usine à ne fabriquer que de la chaux mixte qui est, du reste, préférée par les ingénieurs.

Enfin, Bons fabrique une faible proportion de chaux légère et sa production en chaux lourde et en ciment est très forte; c'est donc principalement une usine à ciment à prise lente et ce caractère sera encore plus prononcé à l'avenir.

Ces différences, en ce qui concerne Le Teil notamment, proviennent surtout de la nature du calcaire employé; mais pour les autres usines de Virieu, de Montalieu et de Bons qui emploient des calcaires similaires, la différence nous paraît provenir principalement de la forme et de la hauteur des fours, de la quantité et de la nature du combustible employé et enfin du tirage des fours. La bonne installation des fours de Bons, au point de vue de l'énergie et de la régularité du tirage, nous semble avoir une grande influence sur la proportion de ciment obtenue.

On peut voir, par cette étude, que la fabrication des chaux hydrauliques exige de grands soins et une surveillance active; il faut aussi que cette fabrication s'applique à une masse assez considérable pour que les petites inégalités qui peuvent provenir d'une différence dans les divers bancs de la carrière exploitée disparaissent dans l'ensemble des manipulations. A ce point de vue, le mode d'exploitation de la carrière n'est pas indifférent et on doit toujours diriger l'extraction de manière à abattre des tranches comprenant les diverses couches exploitées.

La finesse des toiles a une influence très grande dans le blutage des produits qui ont subi une trituration; on sait, en effet, que les parties les plus ténues des ciments sont les plus actives et que les particules qui ne passent pas au tamis de 900 mailles par centimètre carré doivent être considérées comme à peu près inertes. On devra donc donner la préférence aux produits similaires qui proviennent d'un blutage à toile plus fine.

Nous pensons qu'à ce dernier point de vue, le blutage par ventilation améliorera encore la fabrication des chaux lourdes et des ciments et que ce système sera bientôt d'un emploi général dans les usines.

Nous nous sommes borné, dans cette note, à étudier les procédés de fabrication des chaux; il resterait maintenant à faire une étude comparative et simultanée des divers produits au point de vue de leur densité, de la durée de la prise sous l'eau et de la résistance des mortiers. Nous avons l'intention d'entreprendre prochainement cette étude dont les résultats ne pourront être connus qu'au bout d'un temps assez long.

Lyon, le 6 juin 1887.

N° 59

NOTE

SUR

LA THÉORIE DU NIVELLEMENT

Par M. CH. LALLEMAND, Ingénieur des mines,
Secrétaire du Comité du Nivellement général de la France.

La théorie admise jusqu'ici pour le nivellement géométrique est fondée sur l'hypothèse que les surfaces terrestres de niveau (*) sont des sphères concentriques, ou tout au moins des surfaces *parallèles* entre elles.

Or, en fait, comme nous allons le montrer, cette hypothèse n'est pas tout à fait réalisée. De là résultent des anomalies dans les définitions, des inexactitudes dans les résultats du nivellement, qui ont pu longtemps passer inaperçues, noyées au milieu des erreurs pratiques des opérations, mais que les progrès réalisés aujourd'hui, dans les instruments et les méthodes, ne permettent plus de négliger, quand il s'agit surtout de nivellements de haute précision.

Nous nous proposons, dans cette étude, de faire res-

(*) Surfaces (définies par Clairaut et étudiées par Laplace) normales en chacun de leurs points à la direction du fil de plomb, et sur lesquelles, par suite, un déplacement quelconque s'effectue sans travail de la pesanteur. Par chaque point du globe, il passe une surface de niveau, et une seule. La surface des mers — *si leurs eaux restaient en repos* et présentaient partout la même température et le même degré de salure — serait une de ces surfaces.

sortir ces anomalies, et d'exposer les deux moyens principaux que l'on peut employer pour les faire disparaître : l'un, auquel M. le colonel Goulier a donné le nom de *théorie orthométrique*, conservant au nivellement son caractère actuel d'opération *géométrique ;* l'autre, substituant à la définition habituelle de l'altitude une définition *mécanique* basée sur le travail de la pesanteur et, pour cette raison, appelé par M. Cheysson *théorie dynamique.*

§ I. — THÉORIE ACTUELLE. — SES ANOMALIES.

Dans la théorie actuelle du nivellement géométrique, on appelle *altitude au-dessus du niveau de la mer*, ou simplement *altitude,* la hauteur d'un point, comptée sur la verticale, au-dessus de la surface du niveau moyen des mers, prolongée par la pensée au-dessous des continents.

On appelle *différence de niveau* de deux points la distance de l'un de ces points à la surface de niveau qui passe par le second.

On admet que *toutes les surfaces de niveau sont parallèles entre elles et, par suite, équidistantes en tous leurs points.*

Soient (*fig.* 1) deux points A et B :

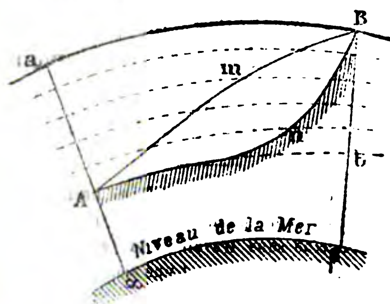


Fig. 1.

Ab, Ba, les surfaces de niveau qui passent respectivement par ces deux points;

Aα, Bβ, leurs altitudes rapportées à la surface $\alpha\beta$ du *niveau de la mer.*

D'après l'hypothèse précédente, on a :

$$A\alpha = b\beta; \quad a\alpha = B\beta.$$

On en déduit que :

$$1^\circ \qquad B\beta - A\alpha = Bb,$$

c'est-à-dire que la *différence d'altitude* des deux points est égale à leur *différence de niveau;*

$$2^\circ \qquad Bb = aA,$$

c'est-à-dire que, d'une manière générale et abstraction faite du signe, la différence de niveau d'un point A par rapport à un point B est égale à celle de B par rapport à A;

3° Enfin, si l'on imagine entre les deux points A et B deux itinéraires A*m*B, A*n*B, la somme des différences de niveau partielles franchies pour aller de A à B, est la même pour les deux itinéraires, puisque, dans les deux cas, cette somme est composée des mêmes éléments, savoir : les ÉCARTEMENTS CONSTANTS des surfaces de niveau successives comprises entre la surface qui passe par le point A et celle menée par le point B. En d'autres termes, cette somme est égale à la différence de niveau, A*a* ou B*b*, des deux points extrêmes; elle est donc *indépendante de l'itinéraire suivi entre ces deux points*.

Mais ces conséquences ne sont vraies que si l'hypothèse primordiale du parallélisme des surfaces de niveau est exacte.

Il est facile de prouver qu'elle ne l'est pas.

On sait, en effet, que, entre deux points donnés, le *travail de la pesanteur* est indépendant du chemin suivi pour aller de l'un à l'autre de ces points (*).

(*) Cette proposition peut s'établir simplement de la manière suivante : La *pesanteur*, pour un point quelconque de masse M (*fig.* 2), est la résul-

Soient (*fig.* 3) :

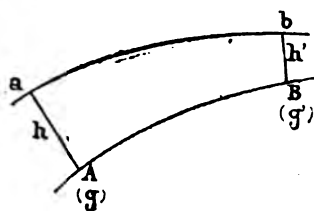


Fig. 3.

AB, *ab*, deux surfaces de niveau infiniment voisines;

h et *h'* leurs écartements, mesurés respectivement sur les verticales des points A et B;

g et *g'* les accélérations de la pesanteur aux mêmes points.

---

tante de la *force centrifuge* et des *attractions* exercées sur ce point par toutes les masses élémentaires, *m*, dont se compose le globe terrestre.

Cherchons successivement l'expression du travail de chacune de ces forces lorsque le point M décrit un circuit fermé.

1° La *force centrifuge* a pour expression

$$M\omega^2\rho,$$

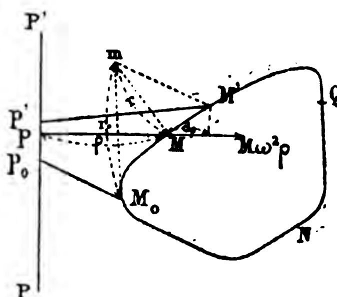


Fig. 2.

ω désignant la vitesse angulaire de rotation de la terre sur elle-même;

ρ la distance du point M à la ligne des pôles PP'.

Pour un déplacement infiniment petit MM' de la masse M, après lequel sa distance à l'axe de rotation est devenue $M'P' = \rho + d\rho$, le travail de la force centrifuge est représenté par l'expression

$$M\omega^2\rho\, d\rho,$$

produit de la force par le déplacement du point d'application projeté sur la direction de la force.

Cette expression est une *différentielle exacte*, dont l'intégrale indéfinie,

$$\frac{1}{2}M\omega^2(\rho^2-\rho_0^2)$$

(ρ_0 rayon vecteur correspondant au point de départ M_0),

s'annule quand on ferme le contour en revenant à l'origine M_0.

2° L'*attraction* de l'une des masses élémentaires *m* sur le point M peut, d'autre part, être figurée par l'expression

$$KMmr^n,$$

K étant un coefficient constant;

r, la distance des deux points M et *m*;

et *n*, un exposant que l'on admet habituellement égal à 2.

Le travail élémentaire correspondant au même déplacement MM' du point M,

On peut aller de A à b en suivant, soit le chemin Aab, soit le parcours ABb.

Dans le premier itinéraire, le travail de la pesanteur (*), pour une masse $M = 1$, se réduit simplement à gh, répondant au parcours Aa, puisque, entre a et b, on suit une surface de niveau sur laquelle le travail est nul. De même, pour le second itinéraire, le travail est $g'h'$.

Ces deux travaux étant égaux en vertu du principe, énoncé précédemment, que le travail de la pesanteur est indépendant du chemin suivi, on a :

$$gh = g'h'.$$

---

est représenté par

$$KMmr^n dr,$$

dr étant la quantité, positive ou négative, dont la masse M s'est rapprochée du foyer m en passant de M en M'

Or, cette expression est également une différentielle exacte, dont l'intégrale,

$$KMm \frac{r^{n+1} - r_0^{n+1}}{n+1}$$

(r_0 rayon vecteur du point de départ M_0), s'annule pour un contour fermé.

Le *travail total*, pour la masse M, quand on parcourt le circuit fermé M_0MQNM_0 est donc la somme de travaux élémentaires individuellement nuls, et, par suite, *il est lui-même égal à zéro*.

Si l'on suppose, pour un instant, le contour M_0MQNM_0 fractionné en deux parties M_0MQ, QNM_0, il résulte du théorème précédent que le travail correspondant à la première partie doit être détruit dans la seconde. Ces deux travaux sont donc égaux et de signe contraire :

$$\text{trav. } M_0MQ = -\text{trav. } QNM_0.$$

Or on a, d'autre part,

$$\text{trav. } M_0NQ = -\text{trav. } QNM_0,$$

puisque ces deux itinéraires sont composés identiquement des mêmes éléments, mais parcourus en sens inverse.

On a donc finalement :

$$\text{trav. } M_0MQ = \text{trav. } M_0NQ.$$

En d'autres termes, le travail de la pesanteur pour aller de M_0 à Q est *indépendant de l'itinéraire suivi*. C. Q. F. D.

(*) Ce travail, pour un mobile de masse M, parcourant un chemin vertical h, en un lieu où l'accélération de la pesanteur est g, a, comme on sait, pour expression le produit : Mgh.

Si les surfaces de niveau étaient parallèles, on aurait d'autre part :

$$h = h':$$

ce qui exige :

$$g = g'.$$

Mais, sans compter les irrégularités connues sous le nom d'*attractions locales*, la pesanteur, en raison de la force centrifuge et de la forme ellipsoïdale de la terre, varie de l'équateur aux pôles.

g' n'est égal à g que dans des cas exceptionnels ; par suite h, diffère de h'.

Le parallélisme en question n'existe donc pas.

Les points A et B ayant été choisis arbitrairement sur la surface de niveau AB, la relation $gh = g'h'$ signifie, d'une manière générale, qu'étant données deux surfaces de niveau, le travail de la pesanteur pour aller de l'une à l'autre (*) est constant.

En d'autres termes, il y a *équidistance dynamique*, mais non *équidistance géométrique* entre ces deux surfaces.

De l'égalité précédente on tire en effet :

$$\frac{h}{h'} = \frac{g'}{g}.$$

C'est-à-dire que l'*écartement des surfaces de niveau varie en raison inverse de la pesanteur* (**).

Les surfaces de niveau n'étant pas équidistantes en tous leurs points, il en résulte que, d'une manière absolue, on doit trouver *autant de valeurs pour la différence*

(*) Ce que l'on appelle encore, en mécanique, la *différence de potentiel*.

(**) Du défaut de parallélisme des surfaces de niveau, il résulte aussi qu'à l'exception de l'axe terrestre et des rayons de l'équateur, les trajectoires de points matériels pesants abandonnés à eux-mêmes et descendant sans vitesse appréciable, — trajectoires qui convergent toutes vers le centre de la terre, en

de niveau de deux points qu'il y a de chemins pour aller de l'un à l'autre de ces points.

Dans l'exemple qui précède, en effet, la différence de niveau trouvée entre A et *b* serait *h* par le chemin A*ab*, et *h'* par l'itinéraire AB*b*.

En revenant au point de départ, après avoir parcouru le circuit fermé AB*ba*A, on ne trouverait pas, comme résultat final, une quantité nulle pour la différence de niveau de ce point par rapport à lui-même; ce qui est absurde!

Un certain nombre de savants ont signalé ces anomalies et se sont préoccupés des moyens de les faire disparaître. Ces moyens rentrent tous, plus ou moins, dans deux théories distinctes, dont nous allons indiquer le principe (*) et le mode d'application.

---

coupant orthogonalement les surfaces de niveau, — sont des lignes courbes tournant leur concavité vers les pôles (*fig.* 4).

Coupe schématique du globe terrestre, montrant la disposition relative des surfaces de niveau et de leurs trajectoires orthogonales.

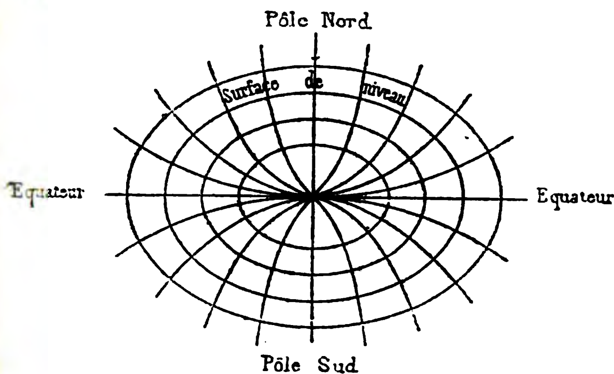


Fig. 4.

Les *verticales* sont les *tangentes* à ces courbes, en chacun de leurs points. Il suit de là que la *latitude* d'un lieu — angle formé par la verticale de ce lieu avec la ligne des pôles — varie légèrement avec la hauteur au-dessus du sol.

(*) Voir, pour les détails, les publications mentionnées à l'Index bibliographique ajouté en Annexe à la fin du Mémoire.

§ II. — THÉORIE ORTHOMÉTRIQUE.

La *théorie orthométrique* a pour but, avons nous dit, de conserver la définition habituelle de l'*altitude* et de corriger les résultats du nivellement pour faire en sorte que les altitudes obtenues représentent effectivement les *distances verticales de chaque point à la surface moyenne du niveau des mers* (ou plutôt à une *surface de niveau* aussi rapprochée que possible de cette surface moyenne, et définie par sa distance verticale à un point fixe choisi comme *repère fondamental*).

Voici comment, en partant des principes généraux précédemment exposés, on peut calculer cette correction.

Soient (*fig.* 5) :

AMB le cheminement suivi;
XY la surface du niveau de la mer;

$$Aa = H_0, \quad Mm_0 = H, \quad Bb = H_1,$$

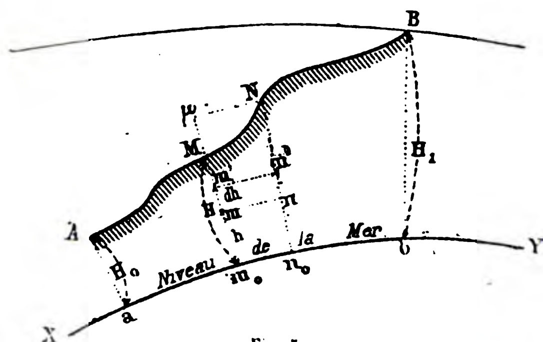


Fig. 5.

les *altitudes orthométriques* des points A, M et B, mesurées sur les verticales de ces points. Connaissant H_0 et les différences de niveau successivement fournies par les stations intermédiaires du nivellement comprises entre A et B, on en déduit, par le procédé habituel, les *altitudes*

brutes de tous les points intermédiaires et finalement celle du point B.

Il s'agit de calculer la correction afférente à chacune de ces altitudes.

Considérons une station MN.

Soit Mμ la différence de niveau correspondante.

D'après la figure, on a, pour déterminer l'*altitude orthométrique* du point N, connaissant celle H du point M et la différence de niveau Mμ des deux points M et N, la relation

$$Nn_0 = H + M\mu - (\mu m_0 - Nn_0).$$

Il faut évaluer la quantité entre parenthèses.

Décomposons, pour cela, les hauteurs μm_0 et Nn_0 en éléments infiniment petits, au moyen de surfaces de niveau intermédiaires, telles que mn et $m'n'$.

Posons :

$$mm_0 = h, \quad mm' = dh,$$

soit g, la valeur *normale* de la pesanteur au point m, c'est-à-dire la valeur donnée par la formule de Clairaut complétée, d'après la règle de Bouguer, par un terme représentant l'influence de l'altitude (*)

$$(1) \qquad g = g^0_{45^\circ}(1 - \alpha \cos 2l - \beta h),$$

$g^0_{45^\circ}$ accélération de la pesanteur au niveau de la mer, sous la latitude de 45°;

l latitude, h altitude du point m

$$\alpha = 0{,}00257, \quad \beta = 0{,}000000196.$$

Entre les deux surfaces de niveau mn, $m'n'$, on a, comme nous l'avons montré précédemment :

$$g.\,dh = \text{constante},$$

(*) La formule de Clairaut, qui donne seulement la variation de la pesanteur en fonction de la latitude, est

$$g = g^0_{45^\circ}(1 - 0{,}00257 \cos 2l).$$

Si l'on pouvait négliger la force centrifuge et ne tenir compte que de la diminution de l'*attraction centripète* lorsqu'on s'éloigne du centre de la terre, la

ou, en différentiant par rapport à l :

$$g.d^2h + (dg)_l.dh = 0,$$

d'où :

$$d^2h = -\frac{(dg)_l}{g}\,dh,$$

d^2h mesurant la différence : $mm' - nn'$.

Mais l'équation (1), différentiée par rapport à l, donne :

$$(dg)_l = 2\alpha g^{0}_{45^\circ} \sin 2l.dl,$$

par suite :

$$d^2h = \frac{-2\alpha \sin 2l.dl.dh}{1-\alpha\cos 2l - \beta h},$$

ou, en négligeant les quantités de l'ordre de α^2, de $\alpha\beta$, ou de β^2 :

$$d^2h = -2\alpha \sin 2l.dl.dh.$$

Si nous intégrons pour toute la hauteur $H = Mm_0$, il vient :

$$(2) \int_0^H d^2h = \mu m_0 - Nn_0 = \epsilon^N_M = -2\alpha \sin 2l.dl \int_0^H dh$$
$$= -2\alpha H \sin 2l \times dl.$$

Telle est la valeur de la correction qu'il faut ajouter à la différence de niveau $M\mu$, obtenue en passant du point M au point voisin N.

Cette correction, comme on le voit, est proportionnelle

---

pesanteur, quand on s'élève à l'altitude h, se calculerait simplement au moyen de la relation connue, exprimant que l'attraction est en raison inverse du carré de la distance :

$$\frac{g}{g_0} = \frac{\rho_0^2}{(\rho_0+h)^2} = 1 - \frac{(\rho_0+h)^2-\rho_0^2}{(\rho_0+h)^2},$$

g_0 pesanteur au niveau de la mer, sur la verticale du lieu considéré;
ρ_0 rayon moyen de la terre = 6.377 kilomètres.

En négligeant les quantités de l'ordre de $\left(\frac{h}{\rho_0}\right)^2$, la formule précédente s'écrit :

$$\frac{g}{g_0} = 1 - \frac{2h}{\rho_0} = 1 - 0{,}000000314\,h.$$

Mais on admet, en général, que, par le fait de l'attraction de la protubérance continentale émergeant au-dessus du niveau des mers, la réduction éprouvée par la pesanteur en une station d'altitude h, est seulement des 5/8 environ de la valeur précédente, soit de $0{,}000000196\,h$ (*Règle* dite de *Young*, mais due en réalité à Bouguer, qui l'a énoncée le premier, en 1749).

à l'altitude moyenne de la station. Elle est nulle au pôle, où $l = 90°$, et à l'équateur, où $l = 0°$; elle atteint son maximum sous la latitude de 45°. Elle est négative quand on va vers le nord ($dl > 0$), positive dans le cas contraire.

La correction totale entre le point initial A et l'extrémité B du cheminement s'obtiendra en intégrant l'expression précédente, par rapport à l, entre les deux limites l_0 et l_1, latitudes des points extrêmes; H étant considéré comme une fonction de l, définie par le profil même du cheminement dans l'intervalle de A à B.

On a donc :

$$\varepsilon_A^B = -2\alpha \int_{l_0}^{l_1} H \sin 2l \times dl.$$

Cette intégrale peut être représentée *graphiquement* et calculée *mécaniquement* d'une manière très simple.

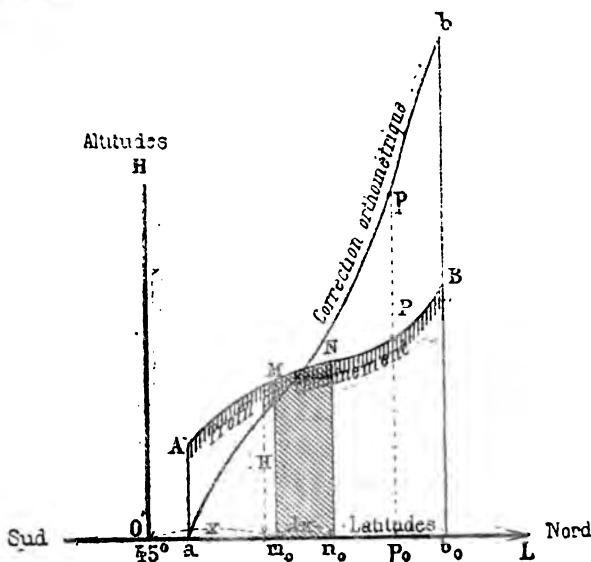


Fig. 6.

Construisons, en effet (*fig.* 6), une courbe ayant pour abscisses les valeurs de

(3) $$x = -\alpha \cos 2l,$$

et, comme ordonnées, les valeurs correspondantes de H pour tous les points du profil nivelé, définis individuellement par leur latitude l et par leur altitude H. C'est une sorte de *projection anamorphosée* de ce profil sur le plan d'un méridien.

L'aire élémentaire dS comprise entre la courbe et deux ordonnées voisines Mm_0, Nn_0, a pour expression : Hdx, ou bien, en remplaçant dx par sa valeur obtenue en différentiant l'équation (3) :

$$dS = H \times 2\alpha \sin 2l . dl,$$

c'est-à-dire précisément, au signe près, la correction exprimée par la formule (2).

Entre le point A et le point N, la correction — que nous appellerons *orthométrique* — est donc représentée par la somme des aires élémentaires telles que Mm_0n_0N ; par suite, elle est égale à l'aire Aan_0NA du profil, prise avec le signe *moins*.

Pour un polygone fermé, elle serait représentée par l'aire totale comprise dans l'intérieur de la courbe correspondante, construite comme nous venons de le dire.

Ces aires s'évaluent de la manière la plus commode à l'aide d'un planimètre. On n'a pas ainsi à s'occuper des boucles que peut former la courbe, ni des changements de signe qui peuvent en résulter pour la correction.

Si l'on porte sur l'ordonnée de chacun des points, tels que P par exemple, du profil AMB, une longueur p_0p égale à la correction, changée de signe, afférente au point P, c'est-à-dire égale à l'aire Aap_0PA, le lieu *apb* des points obtenus est ce qu'on appelle la *courbe intégrale* du profil AMB.

Cette courbe peut être obtenue mécaniquement, d'une façon très simple, en faisant usage d'un des instruments connus sous le nom d'*intégraphes*. Pendant que l'une des *pointes* de l'appareil suit le chemin AMB, le *style* conjugué trace, en effet, sur le papier, la courbe *apb*.

La *fig.* 7 montre l'application de la méthode précédente à un polygone du nouveau Réseau fondamental du Nivellement général de la France, choisi dans la région des Cévennes.

Projection anamorphosée du profil sur le plan d'un méridien.

Carte d'un polygone du Réseau fondamental du Nivellement général de la France.

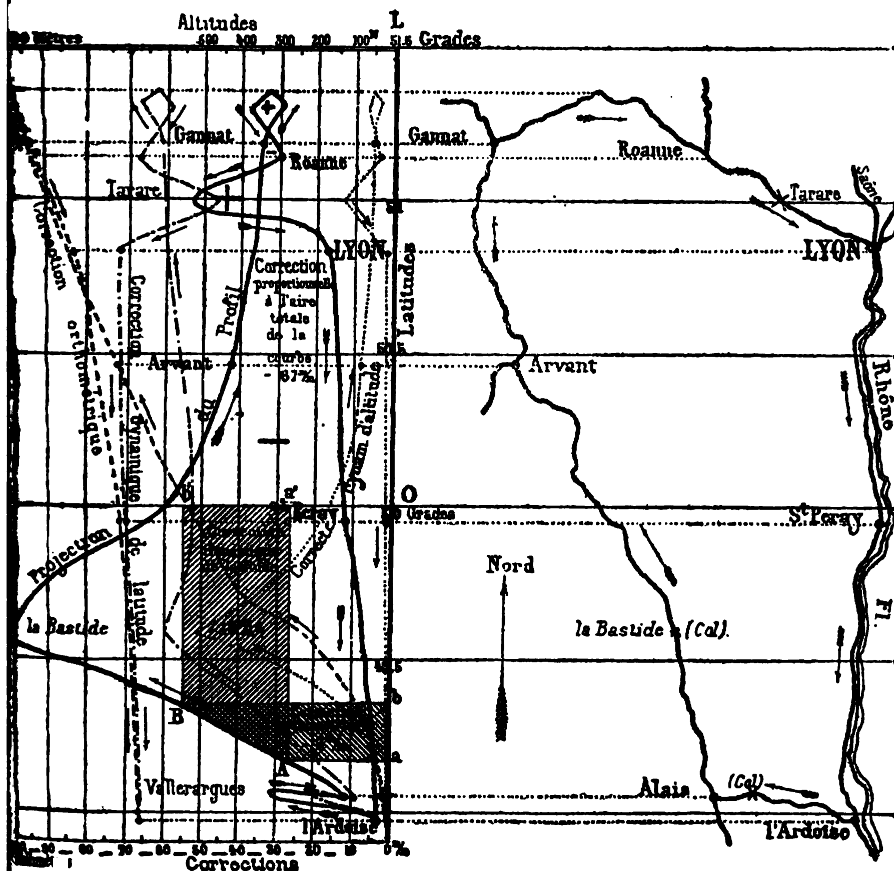


Fig. 7.

1. — Les nombres lus sur l'échelle, pour la *correction dynamique* d'altitude (voir plus loin, § III doivent être doublés.

On a tracé deux axes rectangulaires : l'un, OH, est divisé en parties égales correspondant aux altitudes 100, 200, 300..., 1.000 mètres. Sur l'autre, OL, correspondant aux latitudes, les points de division sont espacés proportionnellement aux valeurs successives du terme :

$$-\alpha \cos 2l = -2^{mm},57 \cos 2l,$$

pour $l = 49^G, 49^G,5\ldots, 51^G,5$ (*).

On a complété et coté le canevas ; puis on y a porté les points principaux du cheminement, c'est-à-dire les points de changement brusque de direction ou de pente, définis chacun par leur latitude et par leur altitude, et l'on a réuni par une ligne continue tous les points obtenus.

On a tracé ensuite la *courbe intégrale* du profil ainsi obtenu, dont les ordonnées, comptées normalement à OL, représentent, avons-nous dit, les *corrections orthométriques* afférentes aux *altitudes brutes* des points correspondants. — Ainsi cette correction atteint, à Roanne, 92 millimètres pour une altitude de 300 mètres.

L'*écart théorique de fermeture* (**) de ce polygone de 741 kilomètres de développement, atteindrait, en raison de la variation de la pesanteur, le chiffre de 67 millimètres, alors que, d'après le calcul des probabilités, si l'on admet pour les opérations mêmes du nivellement une erreur accidentelle probable de 1 millimètre par kilomètre, répondant à un degré de précision

(*) On a préféré, pour la construction de ces profils anamorphosés, la division décimale du quadrant en 100 grades à la division sexagésimale en 90° :

1° Parce qu'elle se prête mieux à l'estime des fractions d'unités ;

2° Parce qu'elle figure sur la carte d'état-major au 80000me, qui a servi à l'établissement de ces profils.

(**) C'est-à-dire, *en supposant les opérations totalement exemptes d'erreurs*, la différence de niveau finale que l'on trouverait en revenant au point de départ.

fréquemment obtenu, l'*écart brut de fermeture* (*) du polygone, en raison des erreurs d'observation, ne devrait pas dépasser en moyenne :

$$1 \text{ millim. } \sqrt{741 \text{ kilom.}} = 27 \text{ millim.}$$

La simple comparaison de ces deux chiffres suffit à montrer, en passant, que les corrections dues à la gravité ne sont plus négligeables, dès que le nivellement sort des pays de plaines, comme l'Allemagne du Nord, la Russie ou la Hollande, pour aborder les contrées plus accidentées du Centre ou du Midi de l'Europe.

§ III. Théorie dynamique.

La seconde théorie est basée sur la propriété fondamentale de l'*équidistance dynamique* des surfaces de niveau (**).

Elle consiste à remplacer, pour la mesure des différences de niveau, l'*écartement variable*, *dh*, entre deux surfaces de niveau infiniment voisines, par *le travail correspondant de la pesanteur*, constant comme nous l'avons montré, quand on passe de l'une à l'autre de ces surfaces :

Ce travail élémentaire évalué en *kilogrammètres* (***),

(*) Somme algébrique de toutes les différences partielles de niveau pour le circuit complet.

(**) Ou, en d'autres termes, sur la *constance du potentiel*, dans l'étendue de chacune de ces surfaces.

(***) Le *kilogrammètre*, qui constitue l'*unité de travail*, représente, comme on sait, le travail dépensé pour élever de 1 mètre un poids de 1 kilogramme, à la latitude de 45° et au niveau de la mer.

La masse correspondant à ce poids a pour expression $\frac{1}{g_{45°}}$. En effet, si dans la formule connue :

$$P = Mg,$$

qui lie entre eux le *poids* P et la *masse* M d'un corps avec l'*accélération*

pour une masse

$$M = \frac{1}{g^0_{45^\circ}}$$

égale à celle de 1 kilogramme, pris à la latitude de 45° et au niveau de la mer, a pour expression :

$$\frac{g}{g^0_{45^\circ}} \, dH.$$

g étant l'accélération de la pesanteur au point considéré.

Entre deux points donnés A et B, le travail total — que nous appellerons la *différence de niveau dynamique* Δ^B_A — est l'intégrale de l'expression précédente :

$$\Delta^B_A = \int_A^B \frac{g}{g^0_{45^\circ}} \, dH, \tag{4}$$

au lieu que la *différence de niveau brute* est représentée par :

$$d^B_A = \int_A^B dH.$$

Si l'on suppose que le point A appartienne à la *surface de comparaison* (surface de niveau zéro), la formule (4) exprime ce que nous appellerons la *cote dynamique* du point B; c'est, comme on le voit, le travail qu'il faut dépenser pour vaincre la pesanteur en allant de la surface de niveau zéro jusqu'au point B.

La formule (4) peut s'écrire aussi :

$$\Delta^B_A = \int_0^B \frac{g}{g^0_{45^\circ}} \, dH - \int_0^A \frac{g}{g^0_{45^\circ}} \, dH,$$

c'est-à-dire que la *différence de niveau dynamique* de

---

g de la pesanteur, nous faisons :

$$P = 1 \text{ et } g = g^0_{45^\circ},$$

nous avons bien :

$$M = \frac{1}{g^0_{45^\circ}}.$$

deux points est égale à la *différence de leurs cotes dynamiques.*

Voyons comment, en pratique, on peut obtenir les cotes dynamiques d'un profil nivelé.

Remplaçons, dans l'équation (4), le quotient $\frac{g}{g^0_{45^\circ}}$ par l'expression équivalente :

$$1 + \frac{g - g^0_{45^\circ}}{g^0_{45^\circ}} = 1 + \gamma,$$

γ désignant ce que nous appellerons la *variation relative de la pesanteur.*

Il vient :

$$\Delta_A^B = \int_A^B dH + \int_A^B \gamma dH = d_A^B + \int_A^B \gamma dH.$$

Cela veut dire que la *différence de niveau dynamique* de deux points A et B s'obtient en ajoutant à leur *différence de niveau brute* une *correction dynamique :*

(5) $$\eta_A^B = \int_A^B \gamma dH.$$

Reste à évaluer cette correction.

Si l'on pouvait mesurer directement la pesanteur g, ou du moins si l'on possédait un instrument à la fois portatif et suffisamment exact, donnant la *variation relative* de g (*), le calcul de η_A^B s'effectuerait aisément de la manière suivante :

(*) Le problème de la construction d'un pareil instrument doit être singulièrement facilité par ce fait que, pour les besoins du nivellement, il n'est pas nécessaire de déterminer g avec une très grande approximation. Ainsi, connaissant g, le long du cheminement, à 1/10.000 près de sa valeur comme erreur accidentelle maxima — soit avec la troisième décimale exacte — on n'aurait pas à craindre, de ce chef, une erreur probable supérieure à $0^{mm},033$ par mètre de différence de niveau D, soit, pour une différence de niveau D, une erreur probable de :

$$0^{mm},033 \sqrt{D},$$

(1 centimètre pour 1.000 mètres de différence d'altitude).

On construirait une courbe, telle que AMB (*fig.* 8), ayant pour abscisses les valeurs successives de γ le long du cheminement, et, pour ordonnées, les altitudes approchées H des points correspondants.

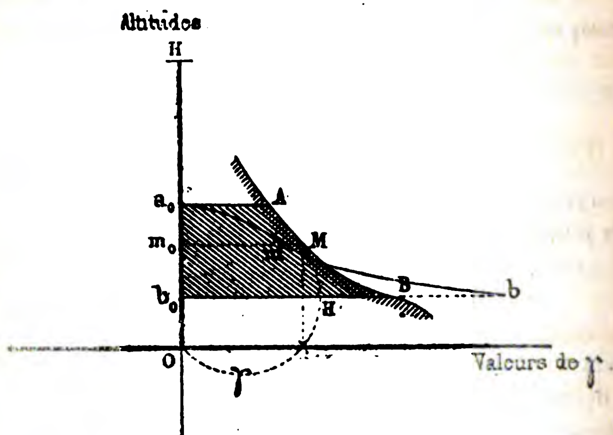


Fig. 8.

L'aire de cette courbe, entre les deux horizontales Aa_0, Bb_0, aurait, comme on sait, pour expression :

$$\int_A^B \gamma dH,$$

Ce serait donc la correction cherchée η_A^B.

Pour un polygone de nivellement revenant au point de départ, l'*écart dynamique* de fermeture, — c'est-à-dire la correction à apporter, du chef de la variation de g, à l'*écart brut* de fermeture — serait égal à l'aire comprise dans l'intérieur de la courbe fermée, construite d'après la règle précédente.

Comme pour la correction orthométrique, on peut évaluer ces aires à l'aide du planimètre, ou bien employer un *intégraphe* pour tracer la *courbe intégrale* a_0mb du profil AMB; les abscisses, telles que m_0m, de cette

courbe, représenteront les *corrections dynamiques* afférentes aux différences brutes de niveau des points M correspondants par rapport au point de départ A.

En attendant l'appareil qui donnera g directement, on peut, comme première approximation, déduire la variation relative γ de la pesanteur, de la formule (1) :

$$g = g^0_{45^\circ}(1 - \alpha \cos 2l - \beta H).$$

D'où :

$$\gamma = - \alpha \cos 2l - \beta H,$$

et, par suite, en vertu de l'équation (5) :

$$\eta_A^B = - \alpha \int_A^B \cos 2l \cdot dH - \beta \int_A^B H \cdot dH,$$

ou enfin :

$$(5^{bis}) \qquad \eta_{1A}^B = - \alpha \int_A^B \cos 2l \cdot dH - \beta \frac{H_B^2 - H_A^2}{2}.$$

H_A et H_B étant les altitudes brutes des points A et B.

Le second terme, dépendant de l'*altitude* seule, peut s'écrire :

$$(6) \qquad -\beta \frac{H_B^2 - H_A^2}{2} = -\beta \left(\frac{H_A + H_B}{2}\right) d_A^B,$$

c'est-à-dire que la *correction dynamique d'altitude* entre deux points donnés est proportionnelle à leur *altitude moyenne* et à leur *différence brute de niveau*.

Pour un polygone fermé, cette correction est nulle, puisque $d_A^B = 0$.

Si le point A se trouve au niveau zéro ($H_A = 0$), la correction dynamique d'altitude se réduit à

$$-\frac{\beta}{2} H_B^2;$$

elle est proportionnelle, comme on voit, au carré de l'altitude du point B.

L'échelle ci-contre, à double graduation (*fig.* 9) donne la valeur de cette correction pour des altitudes comprises entre 0 et 2.000 mètres. On y voit, par exemple, qu'à 100 mètres, elle n'atteint pas 1 millimètre, tandis qu'elle dépasse 35 centimètres à 2.000 mètres.

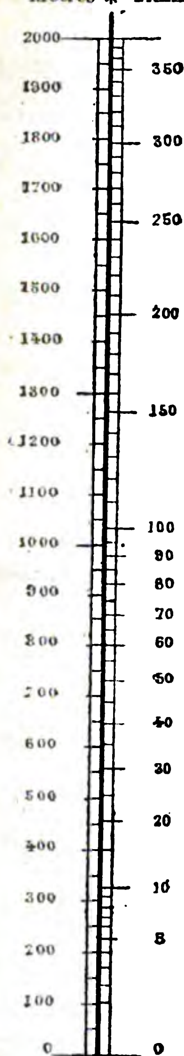


Fig. 9.

Le premier terme de l'équation (5) — que nous appellerons la *correction dynamique de latitude* — peut se calculer en construisant, comme nous l'avons fait (*fig.* 7) pour la correction géométrique, une projection anamorphosée du profil nivelé sur le plan d'un méridien, avec des abscisses égales à $-\alpha \cos 2l$ et les altitudes correspondantes pour ordonnées.

Mais, dans ce cas, pour une section AB, la correction est égale à l'aire comprise, non plus entre les deux horizontales Aa et B b, répondant aux points extrêmes, mais entre les deux ordonnées Aa' et Bb' des mêmes points.

L'erreur théorique de fermeture du polygone complet est d'ailleurs toujours représentée par l'aire totale de la courbe.

On voit, sur la même figure, les deux courbes intégrales du même profil : par rapport à l'axe des latitudes d'une part, de l'autre à celui des altitudes. Les ordonnées de la dernière de ces courbes ont été tournées de 90° et ramenées à s'appuyer, comme celles de la première, sur

l'axe OL. Les ordonnées des deux courbes, pour un même point du profil, représentent ainsi, l'une la *correction orthométrique*, l'autre la *correction dynamique de latitude*.

On voit, par exemple, que pour Roanne, où la correction orthométrique dépasse 90 millimètres, la correction dynamique de latitude n'en atteint pas 70.

Enfin, pour compléter la figure, on y a tracé encore, pour le profil considéré, la courbe des *corrections dynamiques d'altitude* obtenues au moyen de la formule (6).

A défaut du procédé graphique, pour calculer la *correction dynamique*, on peut faire usage de l'abaque ci-contre (*) (*fig.* 10), qui donne séparément les deux *corrections de latitude* et *d'altitude*, pour les valeurs des variables comprises :

1° l, entre 43 et 57 grades (deux parallèles embrassant toute la France);

2° H, entre 0 et 1.200 mètres (limites pratiques entre lesquelles s'effectuent les nivellements de précision dans notre pays);

3° d, entre 0 et 20 mètres (différence de niveau rarement dépassée entre deux repères consécutifs).

La *correction de latitude*, pour la France, atteint son maximum vers Dunkerque, où elle dépasse $0^{mm},53$ par mètre de différence de niveau; elle est nulle vers le centre, dans la région du parallèle de 45° (50^g), où elle change de signe, et elle atteint son maximum négatif à la pointe des Pyrénées-Orientales, où elle est de $0^{mm},27$ par mètre.

(*) Cet abaque a été établi d'après un procédé général, dont le principe se trouve indiqué dans une Note insérée aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (séance du 26 mars 1886) : *Sur une nouvelle méthode générale de calcul graphique au moyen des abaques hexagonaux*, par M. Ch. Lallemand.

Fig. 10.

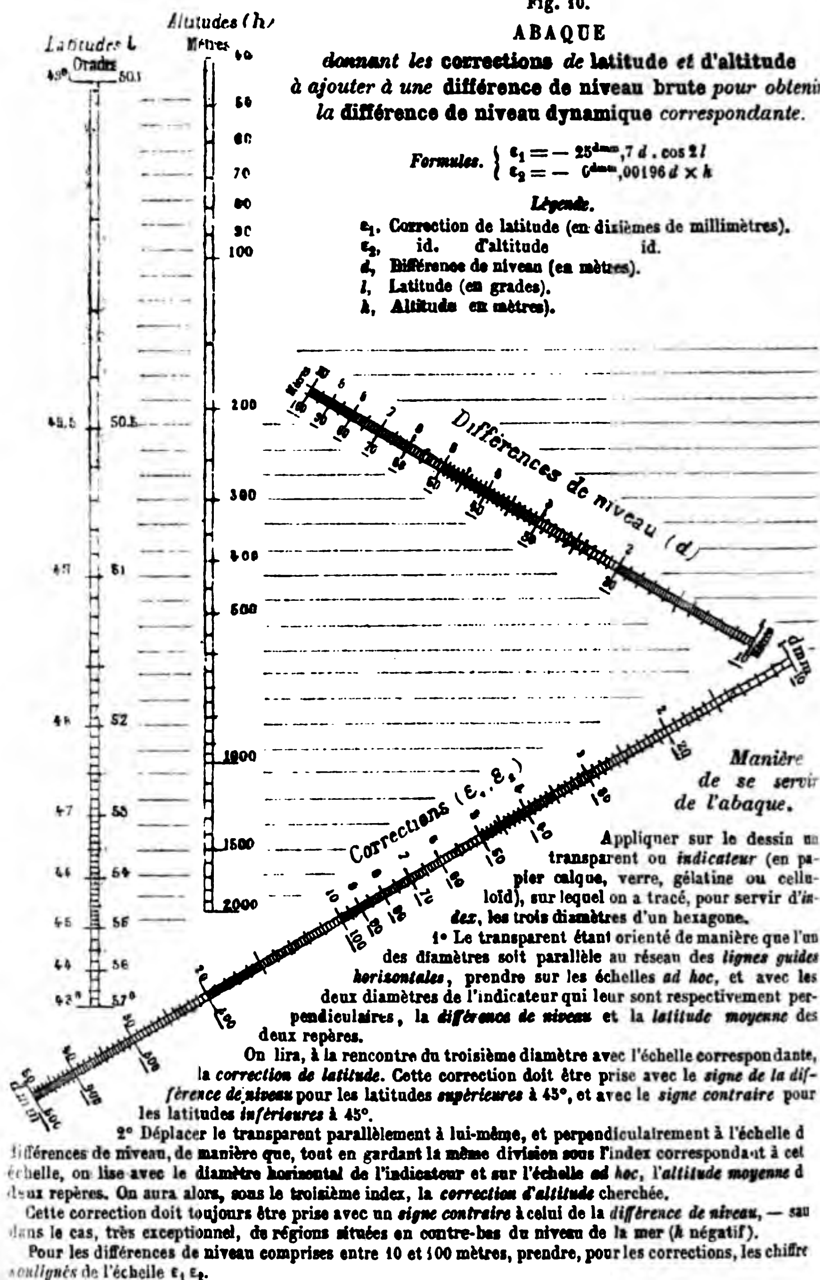
ABAQUE

donnant les **corrections** *de* **latitude** *et* **d'altitude** *à ajouter à une* **différence de niveau brute** *pour obtenir la* **différence de niveau dynamique** *correspondante.*

Formules. $\begin{cases} \varepsilon_1 = -25^{dmm},7\, d \cdot \cos 2l \\ \varepsilon_2 = -0^{dmm},00196\, d \times h \end{cases}$

Légende.

ε_1, Correction de latitude (en dixièmes de millimètres).
ε_2, id. d'altitude id.
d, Différence de niveau (en mètres).
l, Latitude (en grades).
h, Altitude (en mètres).



Manière de se servir de l'abaque.

Appliquer sur le dessin un transparent ou *indicateur* (en papier calque, verre, gélatine ou celluloïd), sur lequel on a tracé, pour servir d'*index*, les trois diamètres d'un hexagone.

1° Le transparent étant orienté de manière que l'un des diamètres soit parallèle au réseau des *lignes guides horizontales*, prendre sur les échelles *ad hoc*, et avec les deux diamètres de l'indicateur qui leur sont respectivement perpendiculaires, la *différence de niveau* et la *latitude moyenne* des deux repères.

On lira, à la rencontre du troisième diamètre avec l'échelle correspondante, la *correction de latitude*. Cette correction doit être prise avec le *signe de la différence de niveau* pour les latitudes *supérieures* à 45°, et avec le *signe contraire* pour les latitudes *inférieures* à 45°.

2° Déplacer le transparent parallèlement à lui-même, et perpendiculairement à l'échelle des différences de niveau, de manière que, tout en gardant la même division sous l'index correspondant à cette échelle, on lise avec le diamètre horizontal de l'indicateur et sur l'échelle *ad hoc*, l'*altitude moyenne* des deux repères. On aura alors, sous le troisième index, la *correction d'altitude* cherchée.

Cette correction doit toujours être prise avec un *signe contraire* à celui de la *différence de niveau*, — sauf dans le cas, très exceptionnel, de régions situées en contre-bas du niveau de la mer (*h* négatif).

Pour les différences de niveau comprises entre 10 et 100 mètres, prendre, pour les corrections, les chiffres *soulignés* de l'échelle ε_1 ε_2.

La *correction d'altitude*, au contraire, par suite de la configuration du relief de notre sol, est presque nulle dans la France septentrionale ; mais elle atteint $0^{mm},21$ par mètre au Lioran, le point de passage le plus élevé des chemins de fer français (1.152 mètres).

On peut se proposer de passer de l'un des deux systèmes à l'autre ; en d'autres termes, connaissant, par exemple, l'*altitude orthométrique* H d'un point B, on peut chercher sa *cote dynamique* C.

Imaginons, par la pensée, que l'on s'élève le long de la verticale du point considéré, depuis le niveau zéro jusqu'au point B lui-même. On a (équation 4) :

$$C = \int_0^B \frac{g}{g_{45^\circ}} dH = \int_0^B dH - \alpha \cos 2l \int_0^B dH - \beta \int_0^B H dH.$$

Mais la latitude étant ici constante, $\int_0^B dH$ représente *exactement* l'altitude orthométrique H du point B, et l'on a par conséquent :

$$C = H - \alpha H \cos 2l - \frac{\beta}{2} H^2.$$

D'où, en désignant par ζ l'*appoint dynamique*, c'est-à-dire la correction à ajouter à une altitude orthométrique pour la transformer en cote dynamique :

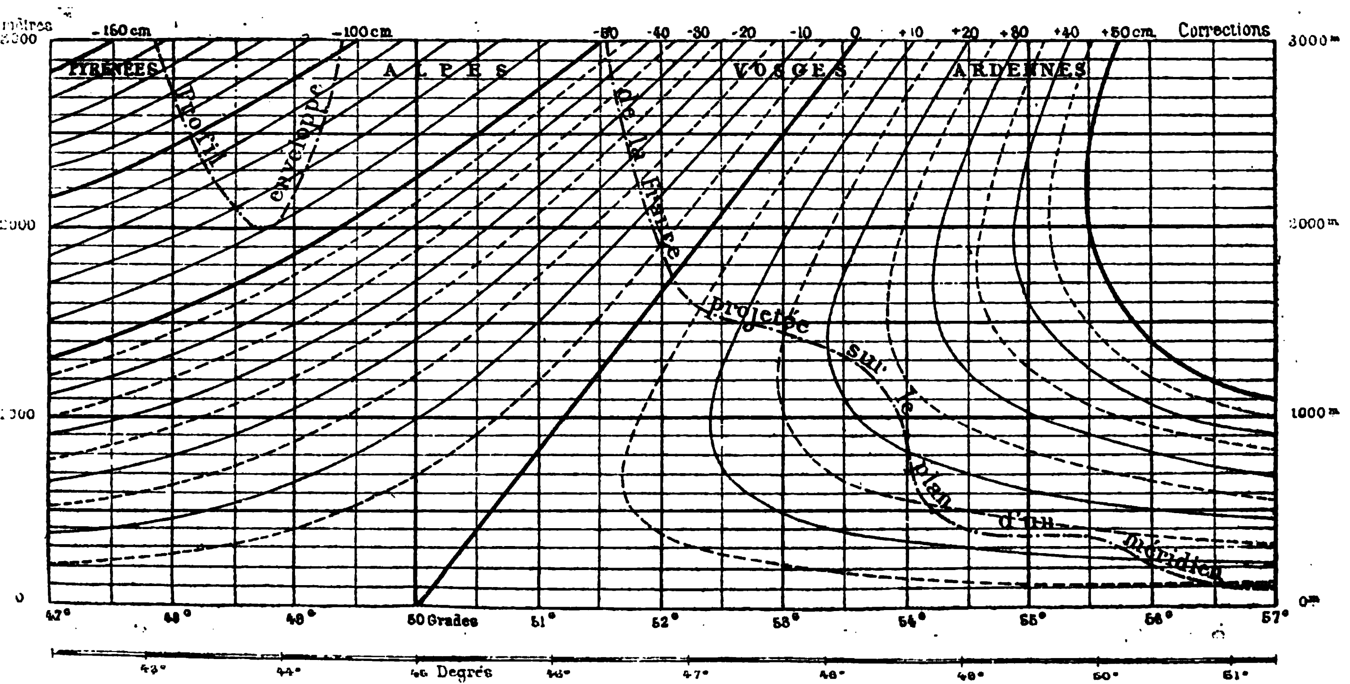
$$\zeta = C - H = -\alpha H \cos 2l - \frac{\beta}{2} H^2.$$

Cette relation entre les trois variables, l, H et ζ, peut être traduite en abaque.

Prenons un canevas rectangulaire divisé, comme celui de la *fig.* 7 : 1° en *altitudes*, représentées par des longueurs proportionnelles ; 2° en *latitudes*, graduées suivant les valeurs de l'expression : $x = -\alpha \cos 2l$. Portons sur ce canevas les systèmes de valeurs de H et de l,

Fig. 11.

ABAQUE *donnant la correction à ajouter à une* **altitude orthométrique** *pour obtenir la* **cote dynamique** *correspondante.*



qui satisfont ensemble à l'équation précédente, dans laquelle on a fait préalablement :

$$\zeta = 1 \text{ millim.}, \ldots\ 2 \text{ millim.}, \ldots\ 1 \text{ cent.}, \ldots\ 10 \text{ cent.}, \ldots \text{ etc.}$$

Joignons les points répondant à une même valeur de ζ.

Les courbes obtenues auront des équations de la forme :

$$\zeta = Hx - \frac{\beta}{2} H^2.$$

Ce sont des hyperboles ayant toutes pour asymptotes :

1° L'axe des latitudes : $H = 0$.

2° La droite : $x = \frac{\beta}{2} H$.

Le diagramme ci-après (*fig.* 11) représente, pour l'étendue de la France, la série de ces hyperboles cotées, ainsi que le profil enveloppe de nos montagnes projetées sur le plan d'un méridien.

On voit sur ce diagramme que, dans le nord de la France, la différence entre les deux systèmes d'altitudes dépasse rarement 10 centimètres; tandis que, dans les Pyrénées, elle peut atteindre jusqu'à $1^m,60$ pour des hauteurs de 3.000 mètres.

§ IV. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

D'après la *théorie actuelle* du nivellement géométrique, le relief du sol, rapporté à la surface de niveau zéro, se trouverait déterminé par ses intersections avec une série de *surfaces auxiliaires*, *parallèles* et *de niveau*, ayant chacune pour caractéristique d'être affectées d'une *cote unique* dans toute leur étendue.

Or, nous l'avons démontré, le *parallélisme* et la conservation du *niveau* sont deux choses incompatibles. Il faut donc opter pour l'une ou pour l'autre.

La *théorie orthométrique*, sacrifiant la considération du niveau, conserve le *parallélisme* des surfaces.

La *théorie dynamique*, au contraire, conserve les surfaces de niveau, en se résignant à perdre le bénéfice de l'équidistance géométrique.

Les deux systèmes ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients.

Ainsi, avec la théorie orthométrique, la définition habituelle de l'altitude n'est pas modifiée; les corrections à apporter aux résultats bruts du nivellement sont relativement faibles et régulières d'allure.

Il suffit, dès lors, de les introduire dans le calcul des altitudes du réseau fondamental des nivellements, sans avoir à s'en préoccuper pour les opérations de détail qui viendraient plus tard s'y appuyer.

En revanche, on peut faire à cette méthode les critiques suivantes :

1° On ne peut dire *rigoureusement* que les altitudes orthométriques des points nivelés représentent les *distances* de ces points à la surface de comparaison, puisque ces altitudes sont mesurées sur les trajectoires orthogonales des surfaces de niveau, lesquelles sont des *lignes courbes ;*

2° Si l'on voulait rapporter le nivellement à une autre surface de niveau, comme celle-ci ne serait pas parallèle à la première, il faudrait, en toute rigueur, ajouter à *chacune des altitudes* une *correction différente ;*

3° Les surfaces de niveau n'étant pas parallèles, les points d'une même *surface de niveau* ont des *altitudes différentes*, et *deux points de même altitude ne sont pas forcément de niveau.* Dès lors, la *différence de niveau*, cessant d'avoir pour mesure la *différence des altitudes*, perd dans cette théorie toute espèce de sens.

La théorie orthométrique doit, dès lors, abandonner le nom de *nivellement* — désignation qui, par son étymologie même, implique essentiellement, comme base du système, la recherche des *surfaces* ou des *courbes de niveau* — pour l'échanger contre la dénomination plus appropriée d'*altimétrie*, les courbes de même cote dans ce système étant appelées des *équialtes*, comme l'a proposé M. le colonel Goulier.

Les altitudes orthométriques offriraient un grand intérêt si la surface de niveau zéro sur laquelle elles s'appuient se confondait avec l'*ellipsoïde de comparaison;* car elles donneraient alors du relief du sol une véritable *définition géométrique*, dans toute l'acception du mot.

Mais à cause des attractions locales et des différences de densité des matières constitutives de l'écorce terrestre, la surface de niveau zéro, suivant les régions, s'écarte de l'ellipsoïde de comparaison, en dessus ou en dessous, de quantités difficiles à calculer d'une manière exacte en l'état actuel de la science (*).

Tout au plus les altitudes orthométriques pourraient-elles, par leur comparaison avec les altitudes des mêmes points déduites d'un *nivellement trigonométrique*, servir à déterminer les ordonnées correspondantes de la surface de niveau zéro, par rapport à l'ellipsoïde de comparaison. Mais ceci supposerait les altitudes trigonométri-

---

(*) D'après des mesures et un calcul de M. de Benazet, cités par M. Yvon Villarceau (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIII, n° 14, 1871), la surface de l'Océan Pacifique, le long des côtes du Pérou, serait relevée de plus de 100 mètres au-dessus de l'ellipsoïde de comparaison, par suite de l'attraction exercée sur les eaux par la chaîne des Andes. On aurait constaté, d'autre part, dans le Caucase, des écarts de 10 à 20 mètres entre la surface de niveau et l'ellipsoïde.

Enfin, d'après M. Helmert (*Höhere Geodäsie*), les relèvements probables du *oïde* (surface moyenne du niveau des mers prolongée sous les continents), ur rapport à l'*ellipsoïde de comparaison*, atteindraient plusieurs centaines mètres sous les massifs continentaux, et des dépressions du même ordre isteraient au centre des principaux Océans.

ques dépouillées, au préalable, des erreurs de réfraction — souvent considérables — que l'on parvient rarement à éviter, et plus difficilement encore à éliminer par le calcul.

Bref, l'objet *principalement géodésique* des altitudes orthométriques, reste encore un but problématique.

Avec la méthode dynamique, au contraire, où chaque surface de niveau est affectée d'une cote unique, le passage d'un niveau à un autre se fait sans difficulté par l'addition d'une constante.

On a fait à la théorie dynamique le reproche de conduire, en l'état actuel, à des résultats moins précis que la théorie orthométrique, et cela parce qu'en l'absence d'un instrument propre à la mesure rapide de la pesanteur, on est obligé de se contenter de la valeur de g donnée par la formule de Clairaut-Bouguer, dont le second terme, exprimant l'influence de l'altitude, est relativement incertain.

Mais cette situation changera complètement, le jour peu éloigné, il faut l'espérer, où l'on pourra mesurer rapidement dans une région, sinon g lui-même, du moins son rapport $\frac{g}{g'}$ à une valeur g' déterminée, avec toute la précision que comporte la science moderne, pour une station située au centre de la région considérée (*).

Il suffirait d'une dizaine de ces stations, réparties sur tout le territoire de la France, pour permettre d'obtenir des cotes dynamiques irréprochables.

Les altitudes orthométriques ne pourraient bénéficier

(*) Les remarquables résultats obtenus, à ce point de vue, par le Servic géographique de l'armée, et dont M. le capitaine Defforges a donné communication à la dernière réunion de la Commission permanente de l'Associatior géodésique internationale, permettent d'espérer que ce vœu deviendra prochainement une réalité.

en aucune façon de cette mesure directe de g, car il faudrait, au préalable, ramener à la surface de niveau zéro les valeurs obtenues à la surface du sol, et introduire, par conséquent, ce même terme de variation avec l'altitude, dont l'incertitude constitue actuellement le principal grief contre la méthode dynamique.

Si la pesanteur variait notablement de l'équateur au pôle — comme c'est le cas pour certaines planètes — la différence entre les résultats d'application des deux méthodes serait tellement grande, qu'elle n'aurait pu passer inaperçue, et que depuis longtemps on aurait dû faire un choix entre les deux systèmes. Sans nul doute, on aurait adopté le système dynamique, qui répond le mieux aux besoins de la pratique, puisque le travail de la gravité constitue, en fait, la véritable donnée utile à connaître, qu'il s'agisse de construire un chemin de fer, une route, un canal, ou d'alimenter d'eau une ville ou une usine.

En réalité, les variations relatives de g ne dépassant pas 2 à 3 p. 1.000, de part et d'autre de la valeur moyenne qui répond à la latitude de 45° (*), les différences entre les cotes exprimées suivant les deux méthodes, sont sans importance pratique, du moins pour la France. On peut donc, comme a décidé de le faire le Comité du Nivellement général de la France, publier côte à côte les résultats des deux méthodes, qui ont chacune leur intérêt et leur objet spécial.

Paris, le 1er novembre 1887.

(*) Le rapport $\frac{g}{g_{45°}}$ est toujours très voisin de 1. Ses limites extrêmes sont, en effet, respectivement 0,9974 à l'équateur, au niveau de la mer (ou 0,9970 si l'on s'élève en outre à une hauteur de 2,000 mètres) et 1,0026 aux pôles terrestres.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

Breton (**de Champ**). — *Traité de nivellement.* (1re édit., 1848.)

Yvon Villarceau. — *Nouveau théorème sur les attractions locales.* (Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. LXVII, 1868.)

Wittstein. — *Ueber die Ablenkung der Lothlinie in Grossen Höhen.* (N° 1768, 1869.)

Yvon Villarceau. — *Nouvelle détermination de la vraie figure de la terre ou de la surface de niveau, n'exigeant pas l'emploi des nivellements proprement dits.* (Comptes rendus de l'Académie des sciences, t. LXXIII, n° 14, 1871.)

Th. Wand. — *Principien der mathematischen Physik und Potential Theorie.* (1871.)

Zachariæ. — *Beiträge zur Theorie des Schlussfehlers geometrischer Nivellements-polygone.* (Astronomische Nachrichten, n° 1916, 1872.)

Wittstein. — *Ueber den Schlussfehler grosser Nivellements.* (Astronomische Nachrichten, n° 1939, 1873.)

Helmert. — *Zur Theorie des geometrischen Nivellirens.* (Astronomische Nachrichten, n° 1939, 1873.)

Zachariæ. — *Ueber den sphæroïdischen Schlussfehler geometrischer Nivellements Polygone.* (Astronomische Nachrichten, n° 1949, 1873.)

Oudemans. — *Ueber den Schlussfehler wegen der sphæroïdischen Gestalt der Erde.* (Astronomische Nachrichten, n° 1970, 1873.)

Yvon Villarceau. — *Nouveaux théorèmes sur les attractions locales et applications à la détermination de la vraie figure de la terre.* (Journal de mathématiques pures et appliquées, t. VIII, 2e sér., novembre 1873.)

Baeyer. — *Ueber der Einfluss localer Lothablenkungen auf das Nivellement.* (Astronomische Nachrichten, n° 1993, 1874.)

Haupt. — *Ueber die Ablenkung des Lothes in der Höhe und den dadurch herbeigeführten Fehler geometrischer Nivellements.* (Astronomische Nachrichten, n° 1996, 1874.)

Börsch. — *Die Lothablenkung und ihr Einfluss auf ein geometrisches Nivellement.* (Berlin, 1875.)

Bruns. — *Die Figur der Erde.* (Berlin, 1878.)

Clarke. — *Geodesy.* (1880.)

Helmert. *Der Einfluss der Lothablenkung bei grossen Gebirgsrücken auf die Ergebnisse geometrischer Nivellements.* (Zeitschrift für Vermessungs wesen, t. XI, 1882.)

Helmert. — *Fortgesetzte Untersuchung über den Einfluss von Localanziehungen auf die Ergebnisse geometrischer Nivellements.* (Zeitschrift für Vermessungswesen, t. XII, 1883.)

Haupt. — *Der Einfluss von Mittelgebirgen und von besonders schweren Massen im Erdinnern auf den Gang der Niveauflächen und die Ergebnisse geometrischer Nivellements.* (Zeitschrift für Vermessungswesen, t. XII, 1883.)

Helmert. *Des geometrische Nivellement.* (Höhere Geodäsie, t. II, chap. VIII, Berlin, 1884.)

Ch. Lallemand. — *Note sur le principe fondamental de la théorie du nivellement.* (Comptes rendus de l'Association géodésique internationale, Conférence de Berlin, 1886.)

Colonel Goulier. — *Sur les corrections des Nivellements de précision.* (Comptes rendus de l'Académie des sciences, 1er et 8 août 1887.)

N° 60

NOTE

SUR

L'EMPLOI DES SELS EN TEMPS DE NEIGE

Par M. CLAVENAD,
Directeur du Service municipal de la ville de Lyon.

Depuis un certain nombre d'années, on emploie avec succès le sel (chlorure de sodium) pour faire fondre la neige, dans le but de faciliter le déblaiement des voies publiques à l'intérieur des villes. Il y a lieu de se demander si, parmi les sels les plus usuels, tout autre sel ne pourrait pas être employé concurremment avec le chlorure de sodium et s'il ne serait pas avantageux notamment d'utiliser pour le même objet divers résidus industriels qui sont à peu près complètement perdus dans certaines fabrications. Cette question a fait, pour nous, l'objet d'une étude à laquelle nous nous sommes livrés, avec la collaboration de M. Busquet, ingénieur des arts et manufactures, attaché à notre service.

Cette note, qui paraît de nature à compléter à certains points de vue le mémoire très instructif que M. l'ingénieur en chef Barabant a publié dans les *Annales* de septembre 1886, contient une analyse du phénomène de déglaçage par laquelle nous avons cherché à déterminer nettement le rôle du sel dans l'opération.

Beaucoup de personnes croient, en effet, que la facilité avec laquelle la neige est déblayée, grâce à l'emploi du sel, tient à la faculté propre au mélange salin de supporter, sans se congeler, une température allant jusqu'à 15° au-dessous de zéro.

Cette propriété, qui répond évidemment à l'une des conditions les plus essentielles de l'opération, n'en est cependant pas la cause efficiente, comme nous allons le voir en recherchant la véritable explication de l'action exercée dans le sein de la masse neigeuse ou glacée par les cristaux de sel.

L'expérience suivante permet de suivre pas à pas les phases du phénomène, et d'en tirer les conclusions pratiques que comporte cette étude : quelques cristaux de sel gemme étant déposés sur un bloc de glace, il se forme bientôt au point de contact de chaque cristal une alvéole remplie d'un liquide incongelable, lequel ne tarde pas à s'épancher en rayonnant dans plusieurs directions. Sur le parcours de cette dissolution saline, le bloc se creuse de sillons qui pénètrent de plus en plus profondément dans la masse, à mesure que le cristal de sel s'enfonce lui-même en se dissolvant, jusqu'à ce que le bloc, entièrement fissuré et percé de part en part, tombe en morceaux d'autant plus divisés que les cristaux de sel ont été employés en plus grande quantité.

On a fait avantageusement l'application de ces essais au déglaçage des anciennes bouches d'arrosage à Lyon. Ces bouches, où l'eau séjourne dans la partie supérieure jusqu'au niveau de la chaussée, sont sujettes à s'obstruer dès que la température s'abaisse au-dessous de zéro. Le tampon de glace formé est facilement percé sur toute sa hauteur par quelques grains de sel placés à sa surface et ne tarde pas à être projeté au dehors sous la pression de l'eau qui jaillit en même temps.

Dans l'expérience précitée, la destruction du bloc est

due aux actions combinées du sel lui-même et de la dissolution saline qu'il engendre. Cette distinction est intéressante, car le cristal et sa dissolution, bien que l'une soit dérivée de l'autre, ont chacun un mode d'action bien différent.

L'action du sel est localisée, autour du grain de cristal, dans une sphère très restreinte et son énergie peut être considérée comme à peu près constante tant que le cristal n'est pas entièrement fondu. Quant à la dissolution saline, son action s'exerce dans un cercle de rayon assez étendu autour du grain de cristal et elle va en s'affaiblissant de plus en plus. En effet, la dissolution formée aux dépens du cristal est à peu près saturée de sel à sa source. Elle attaque alors la glace avec énergie, mais son action diminue à mesure qu'elle se dissémine davantage, car la dissolution primitive, mélangée à l'eau de fusion de la glace, devient de moins en moins concentrée et la force de l'affinité qui détermine la fusion décroît en même temps.

Mais une autre considération très importante tend également à limiter l'action de cette dissolution. Si l'on admet en effet, ce qui est vrai dans certaines limites, que l'abaissement du point de congélation de la dissolution saline est proportionnel à la quantité de sel dissous, on remarquera que cette dissolution deviendra nécessairement inactive dès qu'elle sera assez étendue, pour que son point de solidification corresponde sensiblement à la température ambiante.

Ainsi nous constatons dans l'opération du déglaçage deux actions distinctes : en premier lieu, l'action du sel, action toute locale et à peu près constante quels que soient l'état du cristal et, du moins en ce qui concerne le chlorure de sodium, le degré de température ; d'autre part, l'action de la dissolution qui s'exerce sur une plus grande étendue, mais s'affaiblit progressivement et varie

dans ses limites suivant le degré de la température.

Il s'ensuit immédiatement que, dans les pays où la température est susceptible de descendre notablement au-dessous de zéro, il ne faudrait pas beaucoup compter sur l'efficacité du liquide salin pour faire fondre la neige, mais seulement sur l'action directe des cristaux de sel.

L'efficacité de la méthode dépendrait surtout dans ce cas : 1° de la division plus ou moins grande de la masse neigeuse opérée par les cristaux de sel; 2° de l'action persistante exercée par le phénomène de la dissolution du sel.

Les conséquences pratiques paraissent être les suivantes :

1° Réduire en petits fragments les cristaux employés dans le but de multiplier les points où le sel exerce son action locale, tout en leur conservant des dimensions suffisantes, 2 à 3 millimètres, de manière à prolonger le plus possible la durée de l'action.

Par cette considération, nous pouvons prévoir un bon résultat du mélange de sable fin avec le sel, avant le répandage; les grains de sable auraient vraisemblablement pour effet d'augmenter la quantité de matière active en divisant la neige et aussi en exerçant une certaine action par les débris de sel restés adhérents à leur surface.

Nous pensons également, par ailleurs, qu'il pourrait être avantageux de mêler une certaine quantité de sel dans les boîtes à sable des locomotives pour faciliter le démarrage dans certains cas, en temps de neige, par exemple.

Pour poursuivre nos conclusions, il y aurait lieu de recommander encore :

1° L'exclusion de tout sel déliquescent ou susceptible de s'effleurir rapidement;

3° Le choix d'un sel n'ayant qu'une faible solubilité à

basse température et se dissolvant lentement à la périphérie, sans se fendiller, ni s'émietter sous l'action de la neige.

Ces conditions sont nécessaires, puisque le sel agit alors d'une manière efficace sous la forme solide plutôt qu'à l'état de dissolution, l'action du liquide salin étant rapidement enrayée par la basse température supposée.

La quantité de sel mise en œuvre devra donc augmenter en raison directe de la rigueur du froid.

Ces dernières considérations auraient moins d'importance dans nos pays où les chutes de neige ne coïncident généralement pas avec la température extrême de —15°, comme le fait judicieusement remarquer M. l'ingénieur en chef Barabant dans son mémoire; mais il faudra toujours employer une quantité de sel, telle que le degré de concentration de la dissolution saline formée avec la neige à déblayer corresponde à un point de congélation inférieure à la température ambiante, si l'on veut obtenir l'effet maximum.

Dans tous les cas, le sel joue un double rôle dans l'opération de déblaiement de la neige. Il détermine d'abord la fusion de la neige par son affinité pour cette matière jouant le rôle de dissolvant; il s'oppose ensuite à la formation de la glace en donnant lieu à une solution dont le point de congélation est au-dessous de zéro.

Cette affinité du chlorure de sodium pour la neige s'exerce également sur l'humidité de l'air : c'est pourquoi il convient de conserver le sel dans des locaux couverts, à l'abri des influences atmosphériques. Un fait assez curieux, dont nous avons été plusieurs fois témoin à Alger, peut trouver son explication rationnelle dans cette affinité du sel pour l'eau.

Sur la promenade de Bab-Azoun qui longe les bords de la mer, la chaussée reste la plus grande partie de la journée dans un état de grande sécheresse, mais vers le

soir, ou sous l'influence de certains vents, le sol se recouvre d'humidité absorbée sans doute par la poussière saline qui se mouille au contact d'un air plus saturé.

Les principes que nous venons d'exposer, joints aux diverses considérations tirées des caractères et des propriétés des différents sels, nous permettent de déterminer d'avance parmi les plus usuels ceux qui paraissent devoir être les plus efficaces, suivant les cas, pour le déblaiement de la neige, et ceux qui doivent être rejetés *a priori*, pour cet usage. Nous passons ci-après ces différents sels en revue. Les prix que nous donnons n'ont, bien entendu, qu'une valeur locale et provisoire, mais ils permettent néanmoins une comparaison :

1° *Chlorure de sodium.* — Cristaux de texture compacte, fondant sans s'émietter; solubilité relativement faible et constante à toute température. Prix: 4f,60 p. 100.

2° *Chlorure de calcium cristallisé.* — Sel déliquescent très avide d'eau, fusion rapide, grande solubilité. Prix : 100 p. 100.

3° *Carbonate de soude cristallisé.* — S'effleurit rapidement à l'air; solubilité moyenne. Prix : 7f,75 p. 100.

Ce sel, très alcalin, est d'ailleurs trop caustique pour être projeté sur la voie publique où il pourrait tacher et détériorer les effets des passants.

4° *Sulfate de soude cristallisé.* — Efflorescent à l'air, il tombe promptement en poudre; faible solubilité. Prix : 15 fr. p. 100.

Les sulfates alcalins peuvent se transformer au contact des matières organiques en sulfures susceptibles de dégager des gaz sulfurés dans les égouts. Ce sel nous paraît devoir être écarté dans tous les cas.

5° *Nitrate de soude du Chili.* — Cristaux friables, solubilité moyenne à 0°. Prix : 65 fr. p. 100. — La valeur de ce produit rendrait son emploi relativement onéreux.

6° *Sulfate de fer.* — Cristaux compacts et résistants;

solubilité assez faible à 0°. Prix : 15 fr. p. 100. — A craindre les taches de rouille produites par ce sel.

Résumé. — En définitive, le chlorure de sodium, par son bas prix et ses qualités intrinsèques, nous paraît éminemment propre à l'opération dont il s'agit.

Nous pensons que son emploi pourrait être rendu plus efficace et plus économique en mélangeant le sel, avant le répandange, avec une certaine proportion de sable fin que l'expérience seule peut déterminer.

Comme succédanés du chlorure de sodium, on ne pourrait guère admettre que le nitrate de soude du Chili et le sulfate de fer.

Quant aux résidus des industries chimiques, ce sont presque toujours des mélanges acides ou caustiques qui ne sauraient être employés sur la voie publique sans de nombreux inconvénients.

Lyon, le 4 avril 1887.

CHRONIQUE

(Octobre 1887)

N° 61

Les nouveaux quais de Bordeaux.

Par M. Pasqueau, Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

Une loi du 2 août 1887 vient de déclarer l'utilité publique des travaux projetés et des mesures financières proposées pour compléter le port actuel de Bordeaux.

L'avant-projet comprend l'exécution d'un grand quai de 1.600 mètres de longueur à établir sur la rive gauche de la Garonne, entre l'extrémité aval du quai neuf et l'entrée du bassin à flot.

Ce quai sera constitué par une série de voûtes de 12 mètres d'ouverture, en arcs de cercle surbaissés au 1/6. Ces voûtes, dirigées normalement à la rive, auront 10 mètres de longueur. Elles reposeront sur des piles de 4 mètres sur 10 mètres fondées à l'air comprimé et encastrées de 2 mètres dans l'argile compacte qui se trouve à une profondeur variant de 11 mètres à 18 mètres au-dessous du zéro de l'étiage.

Le quai s'élèvera à 6^{m},65 environ au-dessus du zéro. Il aura, par suite, une hauteur totale variant de 19 à 27 mètres.

L'avant-projet comprend en outre une estacade de 500 mètres de longueur, avec contre-mur en blocs artificiels, à établir sur la rive droite, vers les docks Sursol, et divers travaux complémentaires à exécuter au bassin à flot pour permettre d'en tirer tout le parti qu'on peut en attendre.

La dépense totale est évaluée à 10 millions de francs. Elle se décompose comme suit :

1° Quai vertical de 1.600 mètres à 4.450 francs le mètre courant . .	7.120.000 fr.
2° Estacade de 500 mètres à 1.002^{f},42 le mètre courant.	501.210
3° Travaux complémentaires du bassin à flot	1.350.000
	8.971.210 fr.
Somme à valoir.	1.028.790
	10.000.000 fr.

Cette somme sera entièrement fournie, à titre définitif, par la Chambre de commerce, qui contractera un emprunt de pareil chiffre dans ce but.

La Chambre de commerce sera couverte du capital, des intérêts et des autres frais de cet emprunt, par un droit de tonnage qui est établi par la loi déclarative d'utilité publique suivant les tarifs ci-après :

Navire entré chargé et sortant chargé, par tonneau de jauge légale :

Pour le premier, le deuxième et le troisième voyage effectués dans la même année, du 1er janvier au 31 décembre.	0f,60
Pour le quatrième et le cinquième voyage effectués dans la même année	0f,50
Pour le sixième voyage ou pour tout voyage ultérieur accompli dans la même année	0f,40

Navire entré chargé et sortant sur lest ou entré sur lest et sortant chargé :

Pour les premier, deuxième et troisième voyage	0f,50
Pour les quatrième et cinquième voyages.	0f,45
Pour les autres voyages, toujours dans la même année . .	0f,40

Allège de transbordement chargée, entrant au port de Bordeaux avec marchandises qui proviennent de navires arrêtés en aval, ou sortant du port avec marchandises destinées à des navires arrêtés en aval, quand il s'agit de navires qui ne doivent pas remonter à Bordeaux ou qui n'en sont pas sortis; par tonneau de jauge légale de l'allège :

Pour tout voyage	0f,30

Seront exempts de tous droits : les navires entrant dans le port en relâche, les navires entrés dans le port sur lest et en repartant sur lest, les navires entrant chargés dans le port, qui en repartiraient sans avoir fait aucune opération commerciale, les navires se livrant à la pêche côtière, au cabotage entre les ports français, au remorquage ou au pilotage, les bâtiments de toute nature appartenant à l'État ou employés à son service, les bateaux de navigation intérieure, les navires naviguant au bornage autres que les allèges de transbordement chargées mentionnées au tarif ci-dessus; enfin les gabares ou allèges employées soit à alléger en aval de Bordeaux les navires qui remontent ensuite jusqu'à Bordeaux, soit à compléter le chargement des navires qui, partis de Bordeaux, font escale dans les rades d'aval avant de prendre la mer, lesquels navires devront payer le droit de ton-

nage suivant l'un des tarifs ci-dessus, comme s'ils ne s'étaient pas allégés en aval ou comme s'ils étaient partis de Bordeaux avec la cargaison que leur ont porté les allèges.

Ces droits seront perçus pendant une durée maximum de quarante ans. Ils cesseront d'être perçus dès que la Chambre de commerce aura été couverte de ses obligations.

Les travaux seront exécutés par les Ingénieurs de l'État. Ils devront être terminés dans un délai de trois ans.

Une note autographiée déposée à la bibliothèque de l'école, sous le n° 20.501, fait connaître les détails de cet avant-projet.

Note sur les dragues employées au creusement du canal maritime de la basse Loire.

Par M. Lefort, Ingénieur en chef,
et M. Charron, Ingénieur ordinaire des ponts et chaussées.

I. — *Drague à long couloir « La Châtre ».*

Cette drague a 28 mètres de longueur, 6m,30 de largeur hors ceinture et 6 mètres de largeur de coque.

Sa machine à vapeur, de la force de 50 chevaux, met en mouvement la chaîne à godets. Une machine à vapeur verticale à deux cylindres actionne les treuils de manœuvre. Deux pompes du système Tangye, dont il sera parlé plus loin, prennent leur vapeur au même générateur qui alimente les deux machines précédentes.

Les déblais de chaque godet tombent d'une hauteur de 0m,80 dans un long couloir qui, partant de ce point, s'avance en dehors du bateau jusqu'à une distance de 46m,75 de l'axe de la drague.

Ce couloir, en tôle d'acier de 0m,004 d'épaisseur, a 0m,70 de largeur et autant de hauteur; son fond est demi-rond. Il a une pente de 0m,15 sur 1m,50 à l'origine, 0m,10 sur 3 mètres à la suite, 0m,08 sur 3 autres mètres et 0m,05 sur le reste de son développement.

Il est maintenu au moyen de vingt-quatre câbles d'acier de 0m,018 de diamètre (72 brins) dont vingt sont accrochés en haut d'une bigue de 25 mètres de hauteur dont les deux montants en pitchpin ont 0m,45 sur 0m,45 à la base et 0m,30 sur 0m,30 au petit bout.

La bigue repose sur deux pontons en fer, soudés à la drague par tribord, qui ont 14m,55 de longueur et 3 mètres de lar-

geur chacun. Elle est maintenue dans sa position au moyen de huit câbles en fil d'acier de 0,0225 de diamètre, accrochés d'une part à la tête de la drague et d'autre part à l'extrémité de cette bigue. Deux contrefiches, reposant sur le bord extérieur du dernier ponton, soutiennent également la bigue en diminuant la portée.

Pour maintenir la drague en équilibre, on a établi à bâbord un ponton qui fait contrepoids.

Ce ponton est suspendu par quatre chaînes au haut d'une petite bigue reposant sur la drague et qui est accrochée au haut de cette drague par quatre haubans en fils d'acier. Il est chargé d'un lest de 32 tonnes, susceptible d'être augmenté ou diminué suivant les besoins.

Les déblais des godets sont entraînés dans le couloir par un courant d'eau de 450 mètres cubes à l'heure que fournissent trois pompes placées : l'une sur le ponton contrepoids, de 0^{m},20 de diamètre, qui est mise en mouvement par une locomobile de 20 chevaux ; les autres sur la drague même.

Pour que l'entraînement soit complet, il faut que le volume de l'eau soit égal à deux fois celui des déblais.

La drague dont il s'agit fonctionne depuis peu de temps ; elle enlève et transporte déjà 140 mètres cubes de déblais à l'heure. L'entrepreneur, M. Bord, compte porter ce chiffre à 165 mètres cubes.

Elle a coûté environ 270.000 francs.

II. — *Drague à tuyaux « l'Indre ».*

Cette drague a 28 mètres de longueur et 6^{m},30 de largeur hors ceinture. Sa machine à vapeur, dont la force est de 50 chevaux, actionne la chaîne à godets. Une machine à vapeur verticale à deux cylindres met en mouvement les treuils de manœuvre et de plus un diviseur placé directement sous le point de déversement des godets.

Les déblais tombent sur le diviseur qui est composé de deux arbres armés de lames tranchantes et qui tournent en sens contraire.

La vase, qui est assez ferme et que les godets enlèvent par gros blocs, est ainsi divisée par morceaux de 0^{m},160 au plus d'épaisseur.

Lorsqu'un corps dur (pierre ou bois) est amené sur le diviseur, cet engin s'arrête aussitôt quoique les engrenages conti-

nuent à marcher. On peut ainsi enlever facilement l'obstacle. Ce résultat est obtenu au moyen d'une transmission par friction.

Le puisard a une section rectangulaire de $1^m,55$ sur $1^m,25$.

L'entraînement de la vase dans ce puisard est assuré au moyen d'une pompe qui jette avec violence sur les lames du diviseur 11.000 litres par minute.

Cette pompe, qui a $0^m,250$ de diamètre est installée sur le pont de la drague et est mise en mouvement par une locomobile de la force de 25 à 30 chevaux.

La vase qui a traversé le diviseur est reçue tout d'abord sur une grille horizontale à lames tranchantes espacées de $0^m,140$, puis sur une autre inclinée à 40° dont les lames tranchantes sont distantes de $0^m,08$.

Cette vase ainsi divisée et mélangée de 85 p. 100 d'eau environ tombe sur un plan incliné en tôle qui forme le fond du puisard au niveau du pont de la drague. Elle est alors énergiquement chassée le long du plan incliné vers l'ouverture où aboutit le tuyau des pompes qui doivent la conduire à destination.

La chasse se fait au moyen d'une deuxième pompe de $0^m,175$ de diamètre qui est actionnée par une locomobile de la force de 20 chevaux établie sur un ponton accolé à la drague par bâbord et qui débite 4.200 litres à la minute.

Elle projette l'eau dans le puisard juste au niveau de la partie supérieure du plan incliné sous forme de nappe de $1^m,25$ de longueur et de $0^m,045$ seulement de hauteur. L'entraînement est de la sorte complet sur toute la largeur du plan incliné.

La vase arrive alors dans le tuyau d'aspiration d'une pompe Dumont, spéciale pour déblais, de $0^m,30$, qui repose, ainsi que sa locomobile, sur un ponton accolé à la drague par tribord.

Une seconde pompe, de même nature et de même puissance, aspire la vase refoulée par la précédente et la refoule dans des tuyaux en fer de $0^m,30$. Elle est mise en mouvement par une locomobile spéciale.

Chacune des locomobiles de ces deux pompes développe 30 chevaux de force.

La vase est conduite à la décharge à 200 ou 300 mètres de distance et à une hauteur de 5 à 6 mètres, avec une vitesse de 4 mètres par seconde environ. Le remblai se forme à la sortie du tube en prenant un talus très incliné, mais qu'on peut raidir en faisant de petits bourrelets de retenue. La séparation de l'eau d'avec le sable ou la vase se fait presque immédiatement et le

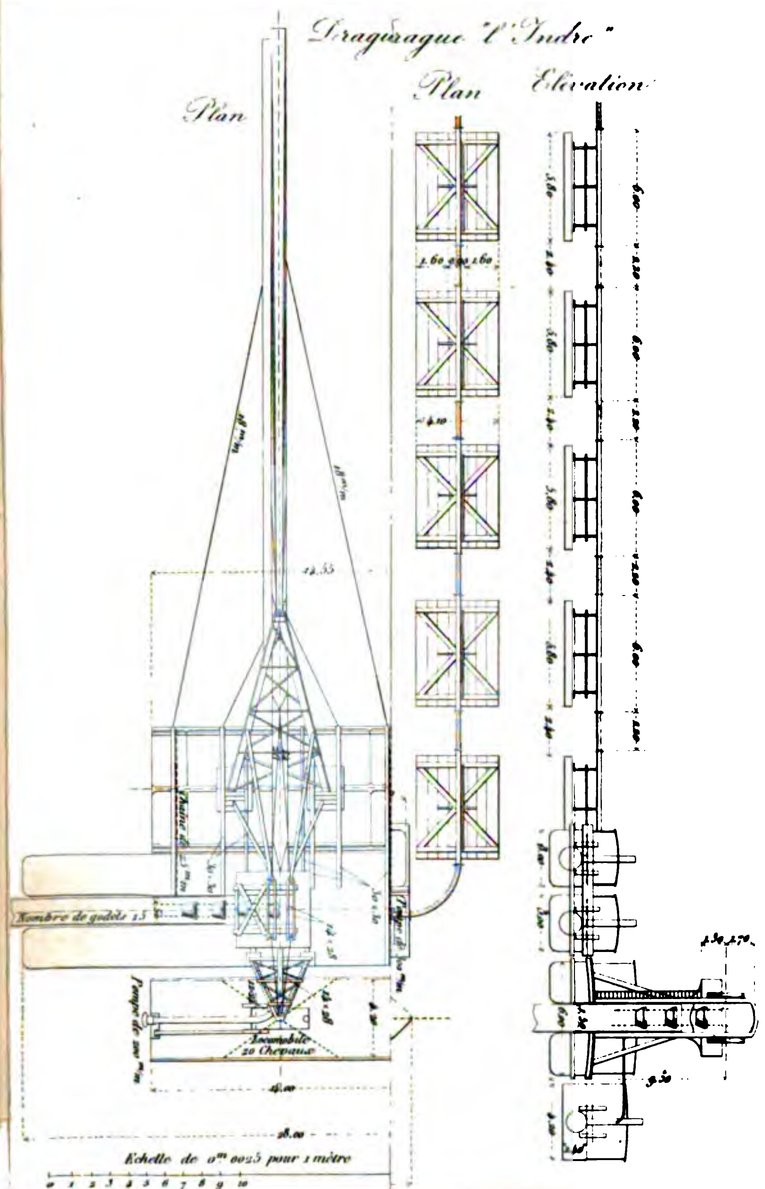
tassement est de suite si complet que les hommes chargés de diriger la décharge peuvent se maintenir dessus tout aussitôt.

La drague dont il s'agit fonctionne depuis peu de temps; elle enlève et transporte déjà 100 mètres cubes de déblais à l'heure. M. Bord compte porter ce chiffre à 125 mètres cubes.

Elle a coûté, avec ses accessoires, 320.000 francs.

Nantes, le 2 août 1887.

École des ponts et chaussées. — MM. les Ingénieurs en Chef sont priés d'envoyer au Directeur de l'École des ponts et chaussées un exemplaire des pièces imprimées ou autographiées de leur service, comme cahiers des charges ou devis spéciaux, types d'ouvrages, rapports au Conseil général et autres, etc. Ces pièces seront très utiles aux ingénieurs, aux professeurs de l'École. Elles seront classées par catégorie et communiquées sur leur demande aux Ingénieurs.



Gravé par Macquet

N° 62

PORT DE DIEPPE

MÉMOIRE

SUR LA

CONSTRUCTION DE L'ÉCLUSE D'AVAL

DU BASSIN DE MI-MARÉE

Par M. PAUL ALEXANDRE,
Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

EXPOSÉ.

La loi du 3 avril 1880 a déclaré d'utilité publique l'exécution, au port de Dieppe, d'importants travaux d'amélioration et d'agrandissement (*).

Le programme de ces travaux comprend notamment l'ouverture d'un chenal à travers le faubourg du Pollet et la création, dans la retenue des chasses, d'un nouvel avant-port donnant accès à un bassin de mi-marée suivi d'un bassin à flot. La construction de l'écluse d'aval du bassin de mi-marée, qui met ce bassin en communication avec l'avant-port, fait l'objet du présent mémoire.

Nous indiquerons tout d'abord d'une manière sommaire

(*) Voir le plan général, planche n° 41.

les dispositions générales de l'ouvrage (chap. I[er]); les fondations seront ensuite décrites en détail (chap. II); puis nous nous occuperons de l'exécution des maçonneries en élévation (chap. III); nous donnerons en terminant quelques renseignements sur les prix élémentaires et le montant total des dépenses (chap. IV).

I

DISPOSITIONS GÉNÉRALES DE L'ÉCLUSE.

§ 1[er]. *Emplacement.* — Quand on prévoit que les fondations d'un ouvrage présenteront de sérieuses difficultés et nécessiteront par suite d'importantes dépenses, on se trouve immédiatement amené à examiner si elles ne pourraient être sinon évitées, du moins réduites, par une modification de l'emplacement auquel on s'était tout d'abord arrêté.

Cette question s'est précisément posée lors de l'étude définitive de l'écluse d'aval du bassin de mi-marée.

Le tracé des ouvrages du nouvel établissement maritime, tel que l'indiquait l'avant-projet annexé à la loi du 3 avril 1880, avait été déterminé surtout par des considérations d'ordre nautique. Avant de procéder à la rédaction des projets de détail, on a fait exécuter des sondages qui ont révélé, aux abords de l'écluse, une variation brusque dans la nature du sous-sol. Celui de la plus grande partie de la retenue des chasses étant très favorable à l'exécution de fondations par épuisements, ne devait-on pas déplacer l'ouvrage, de manière à le ramener dans la zone de la retenue où des difficultés n'étaient pas à redouter?

Il est facile de reconnaître, à la seule inspection du plan, que toute modification dans l'emplacement primitivement choisi devait présenter de graves inconvénients.

Si, en effet, on reportait l'écluse plus à l'Est, on la rapprochait de l'embouchure de la rivière d'Arques, déjà trop peu éloignée, et l'on diminuait le rayon de la courbe à décrire par les navires en sortant du chenal du Pollet pour pénétrer dans les bassins; la direction de ce chenal ne pouvait d'ailleurs être changée, par suite de l'existence de deux monuments importants sur sa rive droite.

Voulait-on, au contraire, ramener l'écluse vers l'Ouest, on était conduit à établir le bassin de mi-marée dans les terre-pleins du cours Bourbon qui devaient servir de quais et ne pouvaient eux-mêmes être élargis vers l'ouest sans déplacer trois établissements industriels qui bordent ce cours.

Si enfin on repoussait l'écluse et, par suite, les bassins vers le Sud, on allongeait outre mesure l'avant-port nouveau dont les dimensions sont déjà très considérables, eu égard à l'objet qu'il doit remplir, et l'on dépensait pour cet allongement une somme très comparable à l'économie que le déplacement de l'écluse pouvait procurer.

Force était donc de la maintenir là où elle avait été projetée, sauf à réduire au strict nécessaire ses dimensions pour rendre ses fondations aussi peu onéreuses que possible.

§ 2. *Dimensions principales* (planche n° 47). — La largeur entre bajoyers a été fixée à 18 mètres. Cette largeur peut paraître faible, comparée à celle des grandes écluses récemment construites dans les ports de premier ordre; il y a lieu de penser cependant qu'elle suffira à tous les besoins, eu égard à la disparition presque complète des navires à roues et à la tendance de plus en plus accusée qu'ont les constructeurs à ne pas donner à la largeur des navires de fort tonnage beaucoup plus du dixième de leur longueur. C'est ainsi que les transatlantiques du dernier type ne mesurent pas plus de $15^m,70$

au maître bau, bien qu'ils n'aient pas moins de 155 mètres de la poupe à la proue (*).

La longueur de l'écluse, 30 mètres, est tout juste suffisante, ainsi qu'on peut s'en convaincre par l'examen du plan, pour permettre de disposer sur les bajoyers une passerelle roulante pour piétons, les appareils de manœuvre des portes et des vannes de sassement, ainsi que les cabestans destinés tant à la manœuvre à bras de ces appareils en cas d'accident qu'au hâlage des navires.

La cote du seuil résulte des dispositions arrêtées pour l'ensemble du nouvel établissement maritime. Placé à 1 mètre en contre-bas du zéro des cartes marines, soit à $0^m,50$ au-dessus du fond du nouvel avant-port, il sera couvert de $7^m,50$ d'eau par les plus faibles pleines mers connues, de près de 11 mètres par les vives eaux extraordinaires et de $5^m,50$ environ à mi-marée. Cette dernière hauteur est suffisante pour permettre le passage des navires d'un tonnage moyen, plus de trois heures avant ou après le moment de la pleine mer.

La saillie du busc au-dessus du radier de la chambre des portes, $0^m,60$, assure aux entretoises inférieures un solide point d'appui et réserve au-dessous d'elles un espace assez grand pour loger les vases, graviers et autres obstacles au mouvement des vantaux.

En plan, le chevron du busc présente une montée égale au cinquième de la largeur de la chambre; on est conduit à cette disposition par la nécessité de donner une bonne surface de buttée aux portes-valets dont l'établissement éventuel a été prévu pour le cas où, contre toute attente, la houle se propagerait avec une grande intensité dans le nouvel avant-port.

(*) Nous devons dire cependant que la Marine, qui avait donné son assentiment au projet, regrette maintenant que l'écluse n'ait pas 21 à 22 mètres de largeur, pour livrer passage aux cuirassés de croisière ($19^m,80$ de largeur) qui doivent accompagner les torpilleurs de la défense mobile.

L'enclave a une longueur de 11 mètres, supérieure de $0^m,42$ à celle des vantaux; les eaux refoulées lors de l'ouverture des portes trouvent ainsi un facile dégagement. La profondeur de l'enclave, $1^m,70$, est juste suffisante pour loger la porte-valet et le vantail, celui-ci ayant été ramené à $0^m,10$ en retraite par rapport au parement des bajoyers, pour être plus à l'abri lors du passage des navires.

Deux rainures de $0^m,50$ sur $0^m,60$, ménagées dans le haut radier et retournées verticalement le long des bajoyers, assurent le passage en siphon, à travers l'écluse, des conduites d'eau douce de la ville et d'eau sous pression, ainsi que le logement des câbles télégraphiques anglo-français qui atterrissent sur la petite plage de Puys, voisine de Dieppe.

Deux aqueducs de sassement, de $1^m,50$ de largeur sur $2^m,50$ de hauteur sous clef, sont établis dans chaque bajoyer; leur radier, placé à la cote $(1^m,00)$, est assez élevé pour qu'on puisse le visiter, en asséchant le bassin à basse mer, lors d'une vive eau. Si l'on veut se rendre compte de l'utilité de ces aqueducs, il faut considérer que le bassin de mi-marée doit fonctionner comme un véritable sas pendant plusieurs heures avant ou après la pleine mer, pour mettre l'avant-port en communication avec le bassin à flot et *vice versa* (*). Les navires qui arrivent dans le port quelques heures après le plein doivent pouvoir pénétrer dans le bassin de mi-marée

(*) Quand il n'y a pas d'étale (comme cela a lieu à Dieppe), le courant de vidange d'*un bassin à flot*, débouchant directement dans un avant-port, devient rapidement violent à mer baissante, et l'on est obligé de fermer les portes d'écluse avant que ce courant rende la manœuvre dangereuse, c'est-à-dire quelques minutes seulement après l'heure de la pleine mer, en vive-eau. — En raison de la faible superficie d'un *bassin de mi-marée*, le courant de vidange n'atteint jamais dans l'écluse d'aval une vitesse assez grande pour gêner la fermeture des portes; on peut donc les laisser ouvertes sans inconvénient jusqu'à l'heure de la mi-marée.

pour être amenés dans le bassin à flot à l'aide d'un sassement; de même ceux qui ont été retenus dans le bassin à flot quelques heures au delà du moment du plein, doivent pouvoir descendre dans le bassin de mi-marée à l'aide d'un sassement et de là prendre la mer. En général, le niveau des eaux doit être tenu dans le bassin de mi-marée vers les cotes (4^{m},00) à (5^{m},00) correspondant à un tirant d'eau de 5 à 6 mètres sur le busc, et les portes de l'écluse d'aval peuvent être ouvertes ou fermées trois heures environ avant et après le plein, sans qu'il soit besoin des aqueducs, quand la mer est montée ou descendue à ces cotes dans l'avant-port. Mais si, ayant eu à faire franchir à un navire l'écluse d'amont et, par suite, ayant nivelé le bassin à flot et le bassin de mi-marée, on a à ramener rapidement ce dernier bassin au niveau de l'avant-port pour laisser entrer ou sortir un navire, il faut recourir aux aqueducs de sassement de l'écluse d'aval et ils doivent alors fonctionner de manière à obtenir dans un temps suffisamment court l'abaissement du plan d'eau. On reconnaît par un calcul très simple que, grâce à la grande section des aqueducs, il suffirait, à mer montante, de 15 à 20 minutes pour niveler le bassin de mi-marée et l'avant-port, étant donnée une différence initiale de hauteur de 3 mètres qui paraît devoir être un maximum. A mer descendante, ce résultat n'est jamais complet. Lorsque la chute se trouve réduite à 0^{m},05 environ, le débit des aqueducs correspond à peu près exactement à la baissée de la mer et la dénivellation reste constante; mais cette petite chute, qu'annule d'ailleurs et au delà la moindre houle, n'empêche pas l'ouverture des portes, les appareils de manœuvre pouvant développer facilement l'excédent de résistance qui en résulte. La durée de l'opération dans ce cas ne dépasse pas une demi-heure, même en vive-eau, la dénivellation initiale étant toujours de 3 mètres. Hâtons-nous de dire que la

manœuvre dont il s'agit est tout à fait exceptionnelle.

L'écluse est munie d'une passerelle roulante pour la circulation des piétons et de quatre cabestans, dont deux à bras et deux hydrauliques, destinés au halage des navires et accidentellement à la manœuvre des portes, actionnées dans les circonstances normales par une machinerie hydraulique.

II

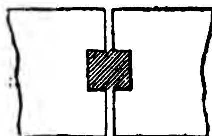
FONDATIONS DE L'ÉCLUSE.

§ 1er. *Choix du système de fondation.* — Dans l'emplacement de l'écluse, le sol est constitué jusque vers la cote (1m,40), au-dessus du zéro des cartes, par des bancs de galets de diverses grosseurs tout à fait analogues à ceux qui forment l'estran de la plage de Dieppe. Au-dessous de ces bancs, qui se laissent facilement traverser par les eaux, on rencontre, sur un peu moins de 2 mètres de hauteur, des couches d'argile et de tourbe; elles recouvrent un gravier non roulé qui règne jusqu'à la craie dont la surface supérieure ne dépasse guère la cote (8m,00) en contre-bas du zéro. La nature du terrain est tout à fait analogue à celle qu'on a constatée en 1868, lors de la construction de l'écluse mettant en communication la Retenue et le bassin Duquesne. Les fondations de cet ouvrage ont présenté les plus sérieuses difficultés. Bien que les fouilles aient été entourées d'une ligne de pieux et palplanches jointifs, les épuisements opérés au moyen de pompes mues par de nombreuses machines fixes et locomobiles ont coûté près de 300.000 francs. Les infiltrations à travers les bancs de galet étaient telles, qu'on se trouvait dans l'impossibilité de mettre à sec en vive eau; on ne travaillait qu'en morte-eau; il a fallu deux ans pour achever les fondations.

On devait rencontrer pour l'écluse nouvelle des conditions plus défavorables encore, attendu, d'une part, que les fondations étaient projetées à un niveau beaucoup plus bas (le radier de l'écluse de la Retenue est à la cote ($1^m,62$), soit plus élevé de $2^m,62$ que celui de l'écluse d'aval), et que, d'autre part, le développement des bâtardeaux à établir pour limiter les fouilles eût été beaucoup plus considérable. L'importance des travaux d'épuisement, l'aléa que présentaient ces travaux tant au point de vue des dépenses qu'au point de vue de la durée, ont fait renoncer à l'idée de fonder l'écluse par les procédés ordinaires et l'on s'est décidé à recourir à l'emploi de l'air comprimé, qui a le grand avantage de conduire rapidement et sûrement au but sans qu'on ait à redouter, quant aux frais, de dépasser les limites du sacrifice que l'on s'est imposé.

Deux solutions ont été étudiées :

La première consistait à fonder les bajoyers et les deux têtes au moyen de quatre caissons de six mètres de largeur formant le périmètre de la surface occupée par l'écluse. Ils devaient être échoués sur le sol dragué uniformément à la cote ($0^m,00$) et descendus à l'air comprimé jusqu'à la craie, soit jusqu'à la cote ($-8^m,50$). Une fois en place, les caissons auraient été soudés entre eux au moyen de maçonnerie de béton. A cet effet, on devait ménager au milieu de leur face de jonction des intervalles formant en quelque sorte des puits de $2^m,50/2^m,50$ que l'on aurait mis à sec à l'aide d'épuisements, déblayés ensuite jusqu'à la craie et maçonnés après enlèvement des tôles. L'enceinte rectangulaire étant ainsi achevée, on aurait asséché la partie centrale de l'écluse, creusé le sol jusqu'au niveau du dessous du radier, détaché les tôles du périmètre intérieur des caissons à partir de ce



niveau et construit à l'air libre les maçonneries tant des bajoyers que du radier.

Cette solution avait l'avantage d'être très économique; mais elle laissait des appréhensions sur le succès final de l'opération, à cause de la difficulté tant de rendre étanche la soudure des caissons que de bien relier les diverses parties de l'écluse constituées de maçonneries d'âges différents.

Il n'était pas certain non plus qu'on ne rencontrerait pas dans la craie, à l'intérieur du périmètre des caissons, des fissures importantes qui laisseraient passer d'abondantes infiltrations et feraient perdre une partie des avantages devant résulter, pour l'établissement des fondations, de l'emploi de l'air comprimé.

Aussi l'administration supérieure a-t-elle prescrit, par une décision du 27 décembre 1880, de recourir à un caisson unique dans lequel l'écluse d'aval devait être construite d'une seule pièce. C'est cette seconde solution qui a été définitivement adoptée.

§ 2. *Description du caisson* (planches n°s 42 et 43). — Avant d'indiquer et de justifier les dimensions principales du caisson, il est nécessaire de dire quelques mots de la profondeur à laquelle il devait être descendu, attendu que cette profondeur a servi de base aux dispositions adoptées.

Le radier de l'écluse était projeté avec une épaisseur de $3^m,60$ se réduisant à 3 mètres dans la chambre des portes.

Ces épaisseurs avaient été déterminées par comparaison avec celles admises pour des ouvrages placés dans des conditions analogues. On sait que c'est là le seul moyen que l'on puisse employer pour fixer les épaisseurs des radiers des écluses à la mer. Le procédé, souvent appliqué sur les rivières et canaux, consistant à assimiler le radier à une suite de poutres encastrées dans les ba-

joyers, soumises à l'action d'une sous-pression uniforme, et à adopter une épaisseur de béton correspondant à un travail maximum de 1 kilogramme par centimètre carré, conduirait, dans l'espèce, à des dimensions excessives.

Avec $3^m,60$ d'épaisseur, le radier de l'écluse d'aval, ainsi calculé, travaillerait dans les circonstances les plus défavorables de la pratique à environ 4 kilogrammes par centimètre carré; bien que très élevé, ce chiffre n'aurait rien d'inquiétant, car d'une part, il ne correspond guère qu'au tiers de la charge de rupture à l'extension de mortier de ciment dosé à 500 kilogrammes par mètre cube de sable de mer ordinaire, âgé d'un an, et, d'autre part, l'hypothèse d'une sous-pression continue sous *toute l'étendue* du radier ne se trouve pas réalisée. En fait, les eaux ne se répandent jamais *librement* sous le radier, sauf dans le cas de communication complète entre l'amont et l'aval, et alors il n'y a plus de sous-pression.

Le seuil du radier étant projeté à la cote $(-1^m,00)$ et son épaisseur ayant été fixée à $3^m,60$, au-dessus du plafond de la chambre de travail qui a elle-même 2 mètres de hauteur, on devait prévoir que les couteaux du caisson seraient descendus à la cote $(-1^m,00 + 3^m,60 + 2^m,00)$, soit $(-6^m,60)$. C'est dans cette hypothèse que les dispositions ont été arrêtées; toutefois, la hauteur de la chambre de travail a été réduite de 2 mètres à $1^m,80$, et l'épaisseur du radier au-dessus du plafond portée de ce fait de $3^m,60$ à $3^m,80$, ainsi qu'il sera expliqué plus loin.

Le caisson a $35^m,40$ de longueur sur $33^m,50$ de largeur et une surface de $1185^{mq},90$. Sa hauteur totale mesure $16^m,60$, de telle sorte que le fonçage étant terminé jusqu'à la cote $(-6^m,60)$, le bord supérieur des tôles atteignait la cote $(10^m,00)$, correspondant aux plus hautes mers d'équinoxe $(9^m,97)$ (*).

(*) En fait, les eaux ne s'élèvent, dans la Retenue, qu'exceptionnellement au même niveau que dans l'avant-port, attendu qu'on ferme à marée montante les

La chambre de travail est divisée par une poutre transversale médiane et par cinq poutres longitudinales en douze compartiments de $5^m,90$ de largeur sur $16^m,75$ de longueur, communiquant librement les uns avec les autres, les âmes des poutres étant en treillis. La partie inférieure de chacune de ces six poutres est munie, comme tout le périmètre du caisson, d'un couteau formé d'une lame de tôle de 18 millimètres d'épaisseur et de $0^m,15$ de hauteur renforcée par deux cornières de $\frac{90 \times 90}{12}$.

Les cloisons des compartiments sont, suivant l'usage adopté pour les chambres de travail, garnies sur tout leur pourtour de contre-fiches espacées les unes de $1^m,047$ et les autres de $0^m,985$ d'axe en axe qui réduisent la portée du plafond à $4^m,10$ dans le sens transversal et $14^m,95$ dans le sens longitudinal.

Le plafond a $0^m,006$ d'épaisseur.

Il est consolidé par une série de 31 poutres transversales espacées de $1^m,047$ d'axe en axe et mesurant alternativement $2^m,10$ et $0^m,80$ de hauteur.

Ces poutres transversales sont croisées à angle droit par cinq poutres longitudinales de $2^m,10$ de hauteur qui prolongent en quelque sorte au-dessus du plafond celles qui, au-dessous, divisent la chambre de travail en compartiments. Ces poutres longitudinales ont ainsi une hauteur totale de $3^m,95$, depuis le dessus de leur semelle supérieure jusqu'au tranchant du couteau.

A leurs extrémités, elles sont surmontées de fermes en cornières qui soutiennent les tôles formant parois amont et aval du caisson; dix fermes de moindre importance fixées aux extrémités de cinq des poutres transversales consolident les parois correspondant aux bajoyers.

---

portes de chasses contre le flot. Dans ces conditions, les variations de niveau se réduisent à $1^m,50$ environ, à chaque marée, de la cote ($6^m,00$) à la cote ($7^m,50$).

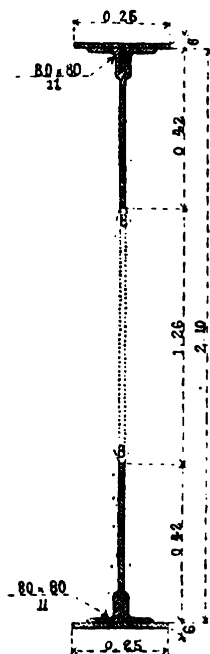
Les parois ont d'ailleurs une épaisseur de 6 millimètres sur la hauteur de la chambre de travail et des poutres qui consolident le plâfond, soit sur $4^m,15$, — de 5 millimètres sur les $3^m,15$ au-dessus, — de 4 millimètres sur une seconde zone ayant également $3^m,15$, enfin de 3 millimètres à peine sur le restant de la hauteur, soit sur $6^m,30$. Elles sont constituées par des feuilles de tôle de $1^m,10$ de hauteur se recouvrant de $0^m,05$, raidies par deux cours horizontaux de petites cornières de $\frac{60 \times 60}{7}$.

Le poids total des fers entrant dans la construction du caisson est de $561^T,5$, représentant 473 kilogrammes par mètre carré de fondation, sur lesquels $446^T,5$, soit 376 kilogrammes par mètre carré correspondent à la chambre de travail, aux poutres qui consolident le plafond et aux parois du caisson sur la hauteur de ces poutres. Ce dernier poids dépasse de 50 p. 100 environ celui (250 kilogrammes) auquel on est conduit pour les caissons de petites dimensions (100 mètres carrés environ) employés couramment pour la construction des murs de quai, des piles et des culées des ponts.

Les dimensions des poutres longitudinales et transversales tant au-dessus qu'au-dessous du plafond, et notamment leur hauteur, ont été déterminées surtout en ayant égard à la nécessité de donner de la rigidité à l'ensemble du caisson et d'éviter des déformations soit pendant le lancement, soit pendant le fonçage ; à ce point de vue, il serait évidemment impossible de produire des calculs justificatifs. On a dû toutefois, avant d'arrêter définitivement ces dimensions, s'assurer par des chiffres que le plafond, consolidé par la série de poutres transversales dont il est surmonté et que les six grandes poutres (la médiane et les cinq longitudinales) qui, avec les parois du caisson, constituent en quelque sorte les supports de l'ensemble de l'ouvrage, seraient capables de ré-

sister aux efforts à prévoir au cas où, pendant le fonçage, l'air comprimé s'échapperait brusquement de la chambre de travail sans que l'eau y pénétrât instantanément pour prendre sa place. Il est clair que, dans cette éventualité, qui n'a rien d'improbable, puisqu'on la réalise quelquefois lors du fonçage pour faciliter la descente quand la surcharge est insuffisante, le caisson, dont le poids et la surcharge ne seraient plus équilibrés par la sous-pression exercée par l'air au-dessous du plafond, aurait une fatigue considérable à supporter.

Poutres transversales. — Les grandes poutres transversales de $2^m,10$ de hauteur, fixées au-dessus du plafond (nous ne tiendrons pas compte des petites intermédiaires), sont espacées de $2^m,094$ d'axe en axe et s'appuient sur les grandes poutres longitudinales espacées de $5^m,90$; toutefois, grâce aux contre-fiches de la chambre de travail qui ont $0^m,90$ de saillie, la portée réelle des poutres transversales n'est que de $4^m,10$.



Au moment où le fonçage touche à sa fin (cote — $6^m,60$), la surcharge par mètre carré doit correspondre à une sous-pression de $16^m,60$ d'eau, soit, en nombre rond, de 17.000 kilogrammes par les plus grandes vives-eaux; elle produirait dans les poutres transversales supposées discontinues et simplement appuyées à leurs extrémités, c'est-à-dire au droit des contre-fiches, des efforts maxima d'un peu moins de 6 kilogrammes par millimètre carré, efforts très faibles eu égard aux hypothèses

éminemment défavorables qui servent de base au calcul et au peu de durée probable de l'effet de la surcharge, l'eau, même dans un terrain compact, ne pouvant tarder longtemps à remplir une chambre de travail vide d'air comprimé.

On remarquera (planche n° 42, *fig.* 1, et planche n° 43, *fig.* 6) que la section des quatre grandes poutres transversales A, B, C, D, placées au droit de la chambre des portes, a été renforcée par l'addition haut et bas d'une semelle supplémentaire de $0^m,01$ d'épaisseur. Les considérations suivantes ont conduit à prendre cette détermination.

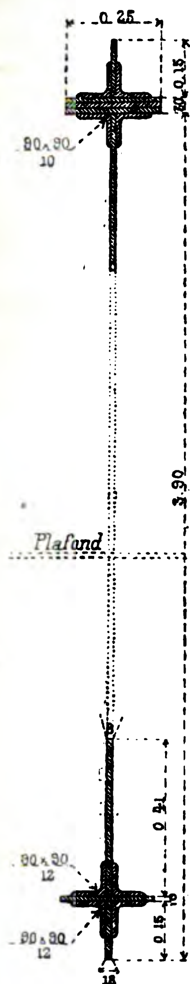
L'épaisseur du radier de l'écluse ($3^m,80$ en aval des portes, $3^m,20$ dans la chambre) ne peut offrir une sécurité suffisante qu'une fois les maçonneries de béton parfaitement durcies. Or, en raison du système de construction employé, on pouvait craindre que les eaux s'introduisissent sous le plafond de la chambre de travail, en cheminant le long des fers, et par suite que la sous-pression se fît sentir sous le radier peu de temps après son achèvement, aussitôt la charge artificielle enlevée pour permettre le montage des portes, les parois du caisson étant maintenues comme bâtardeau pour conserver l'écluse à sec. C'est évidemment dans la chambre des portes que l'effet de la sous-pression pendant cette période de construction eût été le plus à redouter par suite de la plus faible épaisseur du radier et du plus grand écartement des bajoyers qui atteint 21 mètres (*). Il y avait donc intérêt à ce que les poutres transversales fussent suffisamment résistantes pour consolider la portion de radier dont il s'agit et faire face pendant plusieurs mois, au lieu et place du béton, à la plus grande partie de

(*) Au contraire, une fois l'écluse en service, le radier ne devait, dans cette partie de l'ouvrage, n'avoir plus aucun effort dû à la sous-pression à supporter.

la sous-pression. Les eaux de la Retenue qui entourent le caisson, pouvant être maintenues durant ce laps de temps à une cote ne dépassant guère ($8^m,00$) sans gêner le service des chantiers de construction et le plafond de la chambre de travail (dessous du radier) étant descendu à la cote ($-1^m,00 + 3^m,80$), soit ($-4^m,80$), la sous-pression maximum devait correspondre à $8 + 4^m,80 = 12^m,80$ d'eau, soit 12.800 kilogrammes par mètre carré. Si l'on en déduisait le poids du radier $3^m,20 \times 2.100^k = 6.720$ kilogrammes, ainsi que celui des fers du caisson et du béton des contre-fiches qui chargent les poutres transversales et agissent en sens contraire de la sous-pression, soit environ 1.080 kilogrammes, en totalité 7.800 kilogrammes, on trouvait, pour la sous-pression maximum, 5.000 kilogrammes, soit $2.094 \times 5.000^k = 10.500$ kilogrammes par mètre courant de poutre.

Soumis à cette charge, les fers des grandes poutres transversales renforcées, supposées encastrées dans les bajoyers, travailleraient au maximum à 16 kilogrammes par millimètre carré et encore à 14 kilogrammes environ, en tenant compte des petites poutres transversales de $0^m,80$ de hauteur qui alternent avec les grandes et ont été également renforcées au droit de la chambre des portes. Ce chiffre aurait pu paraître inquiétant, si l'on n'avait considéré qu'il avait été fait abstraction complète dans le calcul et de la liaison avec les grandes poutres longitudinales qui, très rigides par suite de leur grande hauteur et incorporées dans le béton au-dessus et au-dessous de la chambre de travail, rendent toutes les parties du haut et du bas radier solidaires — et de la résistance de la maçonnerie du radier, laquelle, dès qu'elle date de quelques semaines, peut supporter, sans se rompre, un effort à la traction de plusieurs kilogrammes par centimètre carré; ajoutons enfin que, comme nous l'avons fait remarquer plus haut (p. 544) en parlant de l'épaisseur du radier,

l'hypothèse d'une sous-pression, agissant sur tout une zone transversale du radier, restait des moins probables. L'expérience a d'ailleurs montré que les infiltrations sous le plafond étant toutes locales, la sous-pression, ainsi calculée, ne se réalise pas, à beaucoup près, dans la pratique, et que c'est avec raison qu'on peut admettre sans danger pour le travail des matériaux basé sur cette hypothèse, beaucoup trop défavorable, non plus le 1/10ᵉ ou le 1/5ᵉ de l'effort de rupture, mais le 1/3 ou la moitié, suivant qu'il s'agit de maçonneries ou de métaux.



Poutres longitudinales. — Les poutres longitudinales sont, avec les parois du caisson, les supports par lesquels il repose sur le sol, et si le fonçage est conduit avec précaution, les couteaux dont sont munies ces poutres et ces parois doivent toujours être, sur tout leur développement, engagés dans le terrain. Dès lors, il suffit de s'assurer que toutes les sections horizontales faites dans le caisson, au-dessous du plafond, sections qui coupent les âmes en treillis des poutres, les cornières constituant les contre-fiches et les tôles des parois, ont une surface suffisante pour que le fer n'y travaille pas d'une manière exagérée dans l'hypothèse précédemment indiquée pour les poutres transversales au-dessus du plafond, de

la surcharge totale du caisson cessant d'être équilibrée par la pression de l'air comprimé, par suite de fuites ou d'arrêt dans les machines. Le poids total du caisson, surcharge comprise, correspondait à environ 17.000 kilogrammes par mètre carré, à la fin du fonçage, soit à 20.000.000 de kilogrammes en chiffres ronds pour l'ensemble de l'ouvrage, et une section horizontale dans la chambre de travail donnait une superficie de fers de $4^{mq},75$ au moins; le travail ne pouvait y dépasser $4^{k},3$ par millimètre carré.

On s'est assuré en outre que les poutres longitudinales ne seraient pas soumises à un effort excessif si, par suite de défaut de précaution dans le fonçage, on laissait les couteaux dans le vide sur une certaine longueur au lieu de les maintenir constamment engagés dans le sol.

Un calcul très simple a montré qu'au cas où une poutre longitudinale serait restée ainsi en quelque sorte suspendue sur 6 mètres de longueur dans les conditions les plus défavorables, le travail des fers n'y aurait pas dépassé sensiblement 6 kilogrammes, en admettant que la liaison de la portion en porte-à-faux avec le restant de la poutre correspondît à un demi-encastrement. On remarquera que pour les trois poutres longitudinales (planche n° 42, *fig.* 5) correspondant au radier, les cornières et la tôle verticale surmontant la semelle supérieure ont été supprimées et remplacées par deux semelles supplémentaires équivalentes. Cette disposition, ainsi que la réduction de 2 mètres à $1^{m},80$ de la hauteur de la chambre de travail, réduction qui a permis d'augmenter de $0^{m},20$ l'épaisseur du radier prévue au projet, ont été adoptées en vue de donner une aussi grande épaisseur que possible à la couche supérieure de maçonnerie du radier, nette de tous fers. On a craint, lors de l'étude du caisson, que les fers ne servissent de conduites aux infiltrations, et l'on a considéré qu'il y aurait intérêt à porter à $1^{m},10$ dans

la chambre des portes et à $1^m,70$ en aval de cette chambre la hauteur de la maçonnerie devant recouvrir les parties les plus élevées des poutres en fer situées au-dessus du plafond. En fait, ces craintes étaient exagérées ; les fers adhèrent bien aux maçonneries, pourvu qu'on ait pris la précaution d'enduire toutes les surfaces de mortier ; d'ailleurs, s'il n'en était pas ainsi, les scellements en mortier de ciment, d'un usage courant aujourd'hui, ne tiendraient pas. Il résulte d'une série d'expériences que nous avons faites à ce sujet, que l'adhérence des fers aux mortiers de ciments est généralement très comparable à l'adhérence de ces mortiers à eux-mêmes ; pour les fers galvanisés, elle est même supérieure à la cohésion des mortiers, si bien qu'on ne peut retirer une tige de fer galvanisé prise dans une masse de mortier de ciment, sans qu'une certaine quantité de mortier reste adhérente.

Les indications qui précèdent montrent dans quel ordre d'idées on s'est placé en vue de s'assurer que l'ossature du caisson serait suffisante pour résister aux efforts qu'elle aurait à supporter ; mais il n'est pas douteux que, dans l'espèce, le calcul laissait une grande marge au sens pratique des constructeurs. Le succès de l'opération a montré qu'en somme les dispositions du caisson étaient satisfaisantes, et c'est à ce point de vue qu'il peut être utile de les étudier. Ajoutons que la rigidité de l'ensemble n'avait rien d'exagéré et que, dans des circonstances analogues, il serait peu prudent de diminuer le poids des fers, si considérable qu'il paraisse au premier abord, comparé à celui employé dans les caissons de dimensions courantes.

§ 3. *Montage et lancement du caisson* (planche n° 44, *fig.* 8). — L'emplacement choisi pour le montage du caisson est un terrain de la Retenue des chasses situé à 55 mètres environ à l'Est de l'écluse à construire. Ce

terrain, de nature marécageuse, a été remblayé d'environ $0^m,75$ au moyen de galets mélangés de sable, et l'on a ainsi constitué une plate-forme suffisamment solide à la cote ($7^m,50$), cote que ne dépassaient les eaux de la Retenue qu'à de rares intervalles; les ouvriers ont pu ainsi travailler au montage sans que le travail ait subi de trop fréquentes interruptions. On accédait facilement à la plate-forme au moyen d'une rampe de $0^m,04$ par mètre munie d'une voie ferrée descendant du cours Bourbon, terre-plein bordant la Retenue à l'Ouest et mis lui-même en communication par rails avec la gare du chemin de fer.

Le caisson a été établi bien horizontal, les couteaux reposant sur une série de chantiers en bois espacés d'environ $1^m,50$ d'axe en axe. Une plaque de tôle de $0^m,01$ était interposée entre le tranchant du couteau et le dessus du chantier pour éviter la pénétration du fer dans le bois. Les tôles et fers ont été rivés à la bouterolle. On a eu soin, pour assurer l'étanchéité, d'interposer du gros papier gris entre les parties des tôles formant recouvrement. Cette précaution a bien réussi; mais on avait omis de la prendre lors de l'assemblage des tôles du plafond, et l'on s'est aperçu, en le recouvrant d'une couche d'eau d'une soixantaine de centimètres d'épaisseur, qu'il perdait abondamment. Les joints ont dû être étanchés au moyen de mastic, et l'on est arrivé assez facilement à n'avoir plus que des suintements insignifiants sous la petite charge servant à faire l'épreuve.

Le poids du caisson, monté seulement jusqu'au niveau des semelles supérieures des poutres fixées sur le plafond, étant de $446^t,5$ et la surface étant de $1.185^{mq},90$, il devait s'enfoncer, lors du lancement, d'environ $0^m,40$ en sus de la hauteur de la chambre de travail (1^m80), c'est-à-dire tirer en totalité environ $2^m,20$ d'eau. Il eût été impossible de le faire flotter, même par une grande

vive-eau (9^m,60) à (9^m,80), les couteaux étant à la cote (7^m,40), sans risquer de voir l'opération compromise par le plus léger incident, l'étale de pleine mer ayant une durée insignifiante à Dieppe. Aussi préféra-t-on commencer par creuser de 0^m,80 l'emplacement sur lequel le montage avait été effectué, et faire descendre sur place le caisson de cette hauteur, de manière que les couteaux fussent à la cote (6^m,60) seulement. Cette descente s'est d'ailleurs opérée avec facilité. On disposait entre deux chantiers consécutifs un chantier intermédiaire dont le dessus était arasé à une dizaine de centimètres en contre-bas des voisins, et quand la série des nouveaux chantiers était complètement installée et bien nivelée, on minait le terrain au-dessous des anciens, de manière à faire descendre peu à peu le caisson aussi uniformément que possible, jusqu'à ce qu'il reposât sur les nouveaux chantiers; on diminuait alors encore d'une dizaine de centimètres la hauteur des anciens et l'on minait le terrain sous les nouveaux chantiers pour faire descendre le caisson jusqu'à toucher les anciens, et ainsi de suite.

Les couteaux étant à la cote (6^m,60) et le caisson tirant 2^m,20 d'eau, il suffisait que la mer montât à la cote (6^m,60) + 2^m,20, soit (8^m,80), pour que le lancement fût possible. On crut devoir attendre une marée de (9^m,75), de manière à être certain que, si les circonstances l'exigeaient, on disposerait d'environ une heure et demie pour l'opération, la mer, par une marée de (9^m,75), se tenant toujours au moins pendant ce laps de temps au-dessus de la cote (9^m,00). Aussi, bien que le montage entrepris dans les premiers jours de mai 1882 fût achevé dès la fin d'août, on fixa au 28 septembre la date du lancement.

L'emplacement dans lequel devait être amené le caisson avait été préalablement arasé à la cote (0^m,00); la zone draguée excédait de 2^m,50 sur tout son pourtour le périmètre du caisson. Les talus de la fouille avaient été

réglés à 1 1/2 de base pour 1 de hauteur; le terrain naturel était primitivement à la cote (10^m,30) du côté de l'Ouest et à la cote (6^m,90) du côté de l'Est.

Le dragage achevé, on avait limité l'emplacement du caisson par une enceinte formée de deux files de pieux distantes de 3 mètres. Ces pieux, écartés de 5 mètres environ d'axe en axe, étaient reliés longitudinalement et transversalement par des moises et des croix de St-André. L'échafaudage ainsi constitué devait servir de guide lors de l'échouage et de passerelle de service pendant la construction. L'enceinte avait été établie sur trois côtés seulement avant le lancement; la face Est, par laquelle le caisson devait être introduit, avait été laissée libre; on avait battu quelques pieux en éventail pour le guider et faciliter l'introduction, au cas où l'opération aurait été contrariée par le vent. Le lancement s'est heureusement effectué sans difficultés et sans incident, par un temps calme; il a suffi de quelques hommes tirant à la main sur l'amarre fixée au caisson pour l'amener, aussitôt à flot, dans son emplacement définitif. Le périmètre de l'enceinte a été immédiatement complété et mis en communication du côté de l'Ouest par une passerelle en charpente avec le terre-plein où le chantier était installé.

§ 4. *Échouage du caisson* (planche n° 44, *fig.* 10 et 11). — Avant d'indiquer les dispositions prises pour l'échouage du caisson, rappelons que le niveau de la souille de la Retenue varie généralement de la cote (6^m,00) à basse mer à la cote (7^m,50) à haute mer, quand on ferme les portes de chasses contre le flot, ce qui était la situation normale pendant la durée des travaux, et que le niveau maximum pouvant être atteint est la cote (9^m,97), soit (10^m,00), par les vives-eaux extraordinaires, les portes étant restées ouvertes. D'après ces données, on recon-

naît immédiatement que pour assurer l'échouage définitif du caisson à la cote ($0^m,00$), quel que soit le niveau de la marée, il fallait une charge totale correspondant à une sous-pression de 10 mètres — $1^m,80$ (hauteur de la chambre de travail), soit de $8^t,20 \times 1.186$ mètres carrés = 9.725 tonnes.

D'autre part, le caisson devait échouer à basse mer, cote ($6^m,00$), dès que la charge atteignait (6 — 1,80) $\times$ 1.186 = 4.981^T, et rester échoué à haute mer dans les circonstances normales ($7^m,50$), quand cette charge atteignait (7,50 — 1,80) $\times$ 1.186 = 6.760^T.

Pour arriver à la charge maximum, le moyen le plus simple et le plus économique à employer était le bétonnage du radier au-dessus du plafond et d'une amorce des bajoyers.

L'épaisseur du revêtement en briques du radier devant être de $0^m,45$ dans la chambre des portes et de $0^m,35$ en dehors de la chambre, les épaisseurs de béton à couler avant le fonçage pouvaient atteindre, sans aucun inconvénient, respectivement $3^m,20 — 0^m,45 = 2^m,75$ et $3^m,80 — 0^m,35 = 3^m,45$, attendu que si quelque irrégularité venait à se produire dans l'enfoncement du caisson, le nivellement serait facilement rectifié avant la pose du revêtement. Pour le même motif, les amorces des bajoyers pouvaient être montées jusqu'à $5^m,45$ au-dessus du plafond, niveau devant correspondre après le fonçage au-dessous du revêtement en briques du radier des aqueducs de sassement.

Le cube total de béton ainsi coulé, ajouté au poids propre du caisson, devait correspondre à très peu près au poids maximum 9.725^T ci-dessus indiqué.

Avant de procéder à la charge du caisson, qui devait augmenter peu à peu en même temps que son enfoncement, il fallait songer à consolider les parois. Formées d'une feuille de tôle mince, elles n'avaient aucune résis-

tance propre, les quelques fermes en fer distribuées sur le pourtour du caisson étant destinées plutôt à relier les parois au plafond qu'à leur permettre de supporter la pression de l'eau.

Le système de consolidation a été ainsi arrêté : des cours horizontaux de petites poutrelles en sapin de 0,15/0,15, espacées de $0^m,33$ environ d'axe en axe, ont été appliquées sur les tôles des parois et y ont été boulonnées, les écrous étant placés du côté intérieur du caisson, de manière que l'enlèvement des poutrelles puisse s'effectuer aisément au fur et à mesure de l'élévation des maçonneries. Devant ces poutrelles on a appliqué (sans les boulonner) des montants verticaux de 0,30/0,30 espacés de $1^m,50$ à $2^m,00$ d'axe en axe. Les montants correspondants des faces opposées du caisson ont été ensuite contre-boutés par une série de cours horizontaux de poutres de 0,25/0,25 à 0,30/0,30 d'équarrissage ayant tout naturellement les dimensions du caisson, c'est-à-dire environ $32^m,60$ de longueur pour les cours longitudinaux et $34^m,50$ pour les cours transversaux. Ces cours étaient espacés dans le sens vertical de 1 à 2 mètres d'axe en axe. Les poutres étaient formées de plusieurs morceaux simplement posés bout à bout, sans assemblage (pour diminuer les déchets). On se contentait de réunir deux pièces consécutives par un double crochet en fer enfoncé au marteau; toutefois, les pièces des cours longitudinaux étaient fixées par des boulons à celles des cours transversaux.

Pour donner un peu de liaison à cette immense charpente dans laquelle entrait un millier de mètres cubes, et aussi pour supporter le plancher supérieur et un plancher intermédiaire nécessaires au service, on avait disposé transversalement à l'écluse cinq grandes fermes

comprenant chacune sept poteaux verticaux de 0,28/0,28 reposant sur les semelles supérieures des poutres du plafond, doublement moisées à leur partie supérieure et vers le milieu de leur hauteur et reliées par des contre-fiches aux poutres transversales et longitudinales devant porter les deux planchers de service.

La charpente que nous venons de décrire sommairement n'a pas été mise en place tout entière immédiatement après le lancement du caisson. Pour éviter les sujétions qu'aurait causées l'enchevêtrement des bois pendant le bétonnage du radier à exécuter avant l'échouage, on s'est contenté de poser tout d'abord les grandes fermes et de soutenir les parois en tôle, sur une certaine hauteur au-dessus des poutres du plafond, au moyen de contre-fiches que l'on renforçait au fur et à mesure de l'enfoncement du caisson et que l'on déplaçait et enlevait même définitivement en suivant l'avancement du béton de l'amorce des bajoyers (voir *fig.* 10 et 11 de la planche n° 44). C'est seulement après l'achèvement du bétonnage, au moment d'entreprendre le fonçage, que la charpente a été complétée.

Le bétonnage du radier exigeait d'assez sérieuses précautions ; il fallait éviter que la surface du plafond ne fût pas chargée d'une manière trop inégale, que le béton ne fût pas délavé par les petites sources provenant du défaut d'étanchéité des tôles du plafond et des parois latérales, que les fers des poutres du plafond fussent bien noyés dans la maçonnerie, que les reprises successives, si difficiles dans les maçonneries qui ne sont pas poursuivies sans interruption, fussent faites de manière à empêcher que des surfaces mal liées ne livrassent plus tard passage aux eaux d'amont en aval.

L'opération a été conduite de la manière suivante : on a étendu le béton par couches horizontales successives ayant de $0^m,50$ à $0^m,75$ d'épaisseur. Dans chaque couche,

le bétonnage a été effectué par bandes transversales à l'écluse, maçonnées sans interruption; la largeur de ces bandes variait de $3^m,00$ à $4^m,75$ environ, de telle sorte que les poutres du plafond fussent toujours comprises dans l'intérieur du massif correspondant à une bande, deux bandes équidistantes de l'axe transversal de l'écluse étant toujours bétonnées simultanément. Les largeurs des bandes de deux couches superposées étaient déterminées de manière à croiser les joints. On avait ménagé vers le milieu de l'emplacement du bajoyer ouest un puisard de $2^m,00/2^m,00$ dans lequel se rendaient les eaux d'infiltration en suivant le plafond ou les parois en tôle sans traverser le béton. Ce puisard, qui ne devait présenter aucun inconvénient, puisqu'il était compris dans le massif du bajoyer à élever ultérieurement, a été bétonné une fois le radier achevé; les eaux qui s'y rendaient ont été recueillies dans une cheminée verticale montée dans le bajoyer et bouchée par un coulis de ciment. Les fers étaient, au fur et à mesure de l'avancement, enduits de mortier par un ouvrier chargé spécialement de ce travail. Les surfaces des couches successives étaient grattées à vif avec le plus grand soin avant l'application de la couche suivante. Grâce à ces précautions, on est arrivé à une étanchéité presque parfaite. C'est à peine si l'on a eu à combattre quelques légers suintements suivant les tôles de quelques cheminées ou apparaissant dans les semelles des poutres laissées à nu au droit des bourdonnières dont la forte hauteur avait obligé de restreindre l'épaisseur du béton dans leur emplacement; recueillis dans de petits drains verticaux lors de la confection du revêtement du radier, ces suintements ont complètement disparu, les drains une fois remplis de mortier de ciment.

Le mortier était dosé à 500 kilogrammes de ciment de Portland par mètre cube de sable pour les quatre premières couches de béton mesurant une hauteur totale de

2m,30 ; au-dessus, le dosage a été réduit à 400 kilogrammes. Le béton était formé de deux parties de mortier pour trois de galet de mer.

Le bétonnage du radier, commencé le 8 novembre 1882, a été terminé le 14 février suivant, après avoir été fréquemment interrompu ou contrarié par l'établissement de la charpente étrésillonnant les parois du caisson que l'on a poursuivi plus activement à mesure que le bétonnage touchait à sa fin.

Dès le 3 janvier, le caisson avait cessé de flotter à haute mer ; depuis le 18 décembre, il échouait à basse mer. On l'avait, dès cette époque, assujetti dans sa position définitive ; des pièces de bois verticales servant de guides avaient été placées entre les parois et l'enceinte en charpente, pour remplir les 0m,20 de jeu réservés tout autour du caisson.

L'axe longitudinal du caisson a été déporté de 0m,10 vers l'Ouest, en raison de ce que le talus, limitant la fouille dans laquelle le caisson allait s'échouer, était plus élevé de ce côté que du côté de l'Est, et qu'on supposait (ce que l'expérience a d'ailleurs confirmé ainsi que nous le disons plus loin, § 6) que, sous l'influence de la plus grande poussée produite par les terres du talus le plus élevé, le caisson aurait, pendant le fonçage, des tendances à riper du côté opposé.

§ 5. *Chargement pour le fonçage* (planche n° 45, *fig.* 1, 2, 3 et 4). — Nous avons vu (page 556) que, pour maintenir le caisson échoué par les plus hautes mers (10m,00), il fallait que son poids fût égal à la sous-pression d'une colonne d'eau de 10m,00 — 1m,80 soit à 9.725 tonnes.

Pour que le fonçage pût être entrepris, il était nécessaire que ce poids devînt supérieur à la sous-pression correspondant à la hauteur d'eau sur les couteaux (10 mètres), soit à 10,00 × 1.186 = 11.860 tonnes.

A la fin de l'opération du fonçage, cette sous-pression devait atteindre 16,60 × 1.186, soit 19.680 tonnes.

Remarquons que ces chiffres étaient des maxima théoriques, attendu qu'en fait, la mer ne devait jamais atteindre la cote (10^{m},00) pendant la durée du fonçage et l'eût-elle atteinte, il eût suffi d'arrêter les machines soufflantes, pour gagner immédiatement la sous-pression correspondant à la hauteur de la chambre de travail, c'est-à-dire 1.186 × 1,80, soit plus de 2.000 tonnes. C'est seulement pendant le bétonnage de la chambre de travail qu'une pareille manœuvre n'eût pu se faire sans de graves inconvénients; or, il était facile d'éviter, pour ce bétonnage qui devait durer une quinzaine de jours seulement, les marées exceptionnelles de l'année; en fait, la hauteur de la mer n'a jamais dépassé (9^{m},20) dans l'avant-port pendant l'opération dont il s'agit et le poids du caisson n'a jamais été supérieur à 18.600 tonnes.

Pour réaliser ce poids, il a fallu ajouter à celui du caisson proprement dit et du béton précédemment coulé, une surcharge en galets que l'on a mise en place au fur et à mesure du fonçage.

Dans l'étude des dispositions à adopter pour la surcharge, on avait dû se préoccuper du programme qui serait suivi ultérieurement pour l'achèvement des maçonneries de l'écluse. Une fois le fonçage terminé, la surcharge devait, en effet, être enlevée par parties successives et remplacée par de la maçonnerie. On ne pouvait arriver à ce résultat qu'en divisant le caisson en compartiments d'où la surcharge serait extraite pour maçonner la zone correspondante.

Le caisson a été partagé par des cloisons en madriers appuyés sur les poutres d'étrésillonnement, en trois zones longitudinales correspondant, la première au bajoyer Est avec une amorce du radier, la seconde au bajoyer

Ouest avec une amorce du radier, la troisième à la partie centrale du radier.

Chaque zone a été divisée transversalement par des cloisons en trois parties correspondant, la première au haut radier, la seconde au busc et la troisième au bas radier. On a ainsi formé neuf cases qui ont été peu à peu remplies de galet sur une hauteur qui atteignait environ 4^{m},20 en moyenne et 6 mètres au maximum au-dessus du niveau du béton précédemment coulé sur le plafond pour former ultérieurement le radier et la base des bajoyers.

Au début de l'opération du fonçage le poids total du caisson était de 9.960 tonnes environ, savoir :

Fers et tôles, cheminées, cloches, etc.. . . .	617^{T}
Charpente	728
Béton.	8.445
Galet	170
Total	9.960^{T}

Le fonçage étant complètement terminé, le poids total atteignait 18.600 tonnes, savoir :

Fers et tôles comme ci-dessus.	617^{T}
Charpente	728
Béton.	8.445
Galet	8.440
Eaux (pluviales et infiltrations).	370
Total.	18.600^{T}

§ 6. *Fonçage* (planche n° 45, *fig.* 5, 6, 7, 8, 9 et 10). — *a.* **Matériel d'extraction.** — Le matériel employé pour le fonçage étant d'un usage courant, nous n'en donnerons qu'une description sommaire.

Les douze compartiments entre lesquels était divisée la chambre de travail par les poutres longitudinales et transversales ont été munis chacun d'une cheminée et d'une écluse placées à peu près au centre du comparti-

ment. Six cheminées débouchaient dans l'emplacement des bajoyers, six dans l'emplacement du radier. Les cheminées sont toujours des points faibles au point de vue des infiltrations, et il eût certainement mieux valu éviter d'en établir dans le radier; cependant nos appréhensions à cet égard ne se sont pas justifiées, et l'on est arrivé à une étanchéité complète aussi bien dans l'emplacement des cheminées que dans les autres parties de la construction. Ces cheminées étaient d'ailleurs formées d'anneaux en tôle de 1 mètre de hauteur chacun, munis à leurs deux extrémités d'une collerette formée par une cornière; les anneaux superposés étaient fixés par des boulons reliant les collerettes. Leur diamètre était intérieurement de $0^m,70$; toutefois deux d'entre elles, d'une section elliptique de $1^m,30$ sur 1 mètre, étaient destinées à introduire au besoin dans la chambre de travail des matériaux ou des appareils qui n'auraient pu passer par les autres. Elles étaient munies d'une échelle en fer appliquée contre la paroi et surmontées d'une écluse circulaire ayant $1^m,80$ de diamètre et $2^m,25$ de hauteur dans l'axe pour les cheminées de $0^m,70$ de diamètre et 2 mètres de diamètre et également $2^m,25$ de hauteur pour les grandes cheminées elliptiques de $1^m,30$ sur 1 mètre. Les écluses étaient disposées de manière à former en quelque sorte quatre sas, savoir :

— Un grand sas cylindrique de $1^m,80$ pour écluser les ouvriers ou les gros matériaux, constituant la chambre principale de l'écluse sur toute sa hauteur et débouchant par une porte de 0,60/0,60 à l'extérieur, et à l'intérieur par le clapet fermant l'orifice de la cheminée;

— Une paire de petits sas latéraux pour écluser les déblais, ayant chacun une capacité de $0^{mc},25$ et débouchant par des portes de 0,40/0,40 à l'extérieur de l'écluse et à l'intérieur de la chambre principale par des clapets de 0,30/0,35;

— Un petit sas cylindrique pour écluser le béton ayant une capacité de $0^{mc},15$, et débouchant à l'extérieur de l'écluse par un clapet circulaire de $0^{m},18$ de diamètre et à l'intérieur de la cheminée, un peu au-dessous de sa jonction avec l'écluse, par un clapet elliptique de $0^{m},50$ sur $0^{m},30$.

Dans les écluses elliptiques, les dispositions étaient analogues.

Chaque écluse était munie d'une soupape de sûreté et d'un manomètre.

A la partie supérieure du grand sas était placé un arbre horizontal, portant une poulie de $0^{m},40$ de diamètre au droit de l'axe de la cheminée; cet arbre traversait la paroi de l'écluse et portait à l'extérieur une autre poulie de $0^{m},90$, de telle sorte qu'il pouvait être manœuvré soit à bras, par l'intermédiaire d'une manivelle, soit mécaniquement, en actionnant la poulie extérieure au moyen d'un câble mû par une locomobile. Sur la poulie intérieure s'enroulait un câble auquel étaient suspendues la benne montante et la benne descendante, sorte de seaux en tôle cubant 16 litres.

En marche normale, une locomobile de 10 chevaux, disposée sur le plancher supérieur du caisson, mettait en mouvement un arbre de transmission régnant sur toute la largeur de l'écluse et pouvant ainsi faire tourner simultanément les poulies de tous les sas.

Les déblais, au sortir des sas, étaient reçus dans des wagonnets Decauville cubant $0^{mc},25$; on les amenait au moyen de voies communiquant par des plaques tournantes jusqu'à l'extrémité de la plate-forme du caisson, d'où les déblais étaient versés sur un plancher extérieur pour être repris et conduits au remblai.

b. **Matériel pour l'air comprimé.** — Le matériel destiné à la production de l'air comprimé comprenait trois locomobiles dont deux de 18 et une de 10 chevaux. Chacune

des deux premières actionnait directement deux pompes à air horizontales à double effet accouplées, la troisième une pompe unique.

Les machines de 18 chevaux marchaient sans interruption, c'est-à-dire 24 heures par jour; la machine de 10 chevaux n'était mise en mouvement qu'au moment où, par l'effet de la marée, le niveau de l'eau dans la souille s'élevait aux environs de la cote (7^m00), soit environ 6 heures sur 24. Quelques jours avant la fin du fonçage, alors qu'on a dégagé les couteaux pour niveler le terrain dans la chambre de travail, les pertes d'air comprimé ont notablement augmenté, et on a dû faire marcher pendant 24 heures la machine de 10 chevaux. Vers le milieu du bétonnage de la chambre qui a duré une quinzaine de jours, les pertes avaient encore augmenté, et l'on ne put empêcher l'invasion de l'eau qu'en installant une quatrième machine conduisant une pompe simple, de telle sorte qu'à la fin de l'opération il fallait envoyer de l'air au moyen de trois paires de pompes pour maintenir la chambre à sec. La sous-pression réelle était alors de près de 14 mètres d'eau.

Vers la fin du fonçage, les machines faisaient en moyenne 45 tours par minute; les pistons des pompes, de $0^m,25$ de diamètre, mus par une tige de $0^m,04$, avaient une course de $0^m,50$; le volume engendré pendant cette course était pour chaque pompe de $0^{mc},024$, soit pour les deux pompes doubles et la pompe unique $5 \times 0^{mc},024 = 0^{mc},120$; de sorte que le volume envoyé dans la chambre de travail était de $45 \times 0,75 = 0,12 \times \frac{1}{2,3} = 1^{mc},8$ environ par minute, soit 106 mètres cubes à l'heure, en admettant pour les pompes un rendement de 75 p. 100. Si l'on compare ce volume à celui de la chambre de travail (y compris cheminées et écluses), 2.200 mètres cubes environ, on voit qu'ils sont dans le rapport de 1/20 environ.

C'est là, d'ailleurs, une simple indication qui ne peut servir de base pour d'autres travaux que dans une très faible mesure, rien n'étant plus variable que le rapport dont il s'agit, suivant la nature du sol dans lequel sont engagés les couteaux. Considérable dans un terrain laissant passage à l'air comme du tuf fendillé, le volume à envoyer dans la chambre de travail pour la tenir à sec devient presque nul quand le caisson est engagé dans une argile compacte. Pour des natures de terrain peu différentes, ce volume d'air varie peu avec les dimensions des caissons; ainsi, lors de la reconstruction du mur de quai des paquebots à Dieppe, les caissons dont la superficie mesurait de 80 à 120 mètres carrés étant foncés dans un terrain analogue à celui rencontré pour le grand caisson de l'écluse, le cube d'air nécessaire à l'heure pour la tenue à sec de la chambre de travail de ces caissons n'était guère inférieur à la moitié du cube envoyé dans la chambre de travail du caisson de l'écluse dont la superficie (près de 1.200 mètres carrés) était cependant de dix à quinze fois plus considérable. Les volumes étaient d'ailleurs à peu près dans le rapport du développement du périmètre des caissons (138 mètres pour celui de l'écluse, 50 mètres environ pour les caissons du mur des paquebots). Remarquons encore que le volume d'air nécessaire dans le grand caisson (106 mètres cubes) était peu différent de ceux indiqués dans le mémoire de M. l'ingénieur Séjourné (*Annales* de 1883, 1[er] semestre, page 147) pour des caissons de 45 à 90 mètres carrés seulement de superficie foncés dans des conditions qui ne paraissent pas différer beaucoup de celles dans lesquelles nous nous trouvions placés.

Il semble qu'il se produise, lors de la mise à sec d'une fouille au moyen de l'air comprimé, quelque chose d'analogue à ce que l'on observe quand on opère la mise à sec à l'aide d'épuisements; dans la plupart des cas, à pro-

fondeur égale, le volume d'eau à enlever augmente dans une faible proportion à mesure que la superficie de la fouille devient plus considérable.

Chacune des paires de pompes à air était mise en communication avec l'une des écluses au moyen d'un tuyau en fer de 0^m^,033 de diamètre intérieur. A l'origine de chacune des trois canalisations, on avait placé un récipient d'air d'un mètre de hauteur et 0^m^,40 de diamètre servant de régulateur.

Les écluses étaient d'ailleurs mises deux à deux en communication par des tuyaux de 0^m^,010 de diamètre intérieur.

c. **Exécution des déblais.** — La composition du chantier pour l'exécution des déblais était la suivante :

Pour chaque compartiment de la chambre de travail correspondant à une écluse, le personnel comprenait :

Dans la chambre de travail pour extraction et charge des déblais.	2	ouvriers.
Dans l'écluse pour vider les bennes	2	—
Hors de l'écluse pour vider les sas aux déblais. . . .	1	—
Chef d'équipe.	1	—
Total.	6	ouvriers.

Il faut ajouter, pour la conduite des déblais à la décharge, un ouvrier par deux écluses, et pour la surveillance générale, un chef de poste dans la chambre de travail et un autre à l'extérieur.

En général, sept écluses, rarement huit, fonctionnaient simultanément. La machine actionnant la transmission ne pouvait en desservir davantage. Le cube extrait, une fois le travail bien en train, atteignait environ 120 mètres cubes, soit 17 mètres cubes (*) par écluse, correspon-

(*) Une écluse bien servie peut débiter environ 20 mètres cubes par vingt-quatre heures quand la poulie est actionnée mécaniquement et 15 mètres cubes quand elle est mue à bras ; mais dans la pratique, ces rendements ne sont pas atteints, parce qu'une partie du personnel est occupée pendant plusieurs heures de la journée à dégager les couteaux pour faire descendre le caisson.

dant à un enfoncement du caisson de $0^m,10$; en fait, l'enfoncement moyen, depuis le jour où la transmission actionnant les bennes a commencé à fonctionner, n'a guère été de plus de $0^m,07$; commencé le 5 mars, le fonçage était complètement terminé le 2 juin.

L'opération a d'ailleurs été effectuée avec une grande régularité et n'a donné lieu à aucun incident. Les déblais étaient extraits uniformément sur toute la superficie de la chambre de travail, puis l'extraction était interrompue et l'on dégageait simultanément les couteaux de tous les compartiments, de manière à produire un enfoncement de 8 à 10 centimètres; des échelles peintes aux angles et au milieu des faces du caisson permettaient de suivre les mouvements, et si le caisson s'inclinait, il était facile de le ramener dans sa position normale en dégageant les couteaux correspondant à la zone la plus élevée. Le jeu des marées facilitait d'ailleurs ces opérations, en raison de l'augmentation de surcharge que produisait l'abaissement du niveau de l'eau à basse mer. L'inclinaison totale du caisson ne dépassait guère une douzaine de centimètres; elle a atteint exceptionnellement $0^m,18$ à $0^m,20$. Quant à sa déformation mesurée par la distance de l'un des angles inférieurs du caisson à un plan passant par les trois autres, cette déformation, qui était d'environ $0^m,10$ lors du lancement, atteignait $0^m,14$ après le bétonnage du plafond, à l'époque où le caisson a cessé de flotter (1er février), et $0^m,19$ (*) lors du commen-

(*) Ces chiffres, $0^m,10$ - $0^m,14$ - $0^m,19$ - $0^m,07$, donnent une mesure probablement exagérée de la déformation; si on l'évaluait par les distances des angles à un plan en quelque sorte moyen, c'est-à-dire qui laisserait les angles les uns au-dessus, les autres au-dessous de lui, on trouverait évidemment des écarts moindres (généralement de plus de moitié). Les déformations du caisson avant le bétonnage au-dessus du plafond sont toutes naturelles; celles qui ont été constatées après cette opération, le plafond étant consolidé non seulement par les poutres métalliques, mais encore par un massif de béton ayant de $2^m,30$ à $3^m,45$ d'épaisseur, et sans qu'aucune fissure se soit produite, ne peuvent

cement du fonçage, après que la surcharge a été complétée en vue de cette opération. Peu à peu la situation s'est améliorée et l'écart était réduit à $0^m,07$ une fois la descente terminée, la différence maximum de cote des quatre angles n'étant elle-même que de $0^m,04$ seulement. La cote moyenne était alors de ($-6^m,61$).

Les couteaux reposaient alors sur un gravier jaune, très compact, constituant un excellent sol de fondation. En plan, le caisson ne s'était pas déplacé pendant le fonçage dans le sens longitudinal; l'axe transversal avait conservé exactement sa position initiale. Dans le sens transversal, le déplacement a été de $0^m,13$; mais, comme nous l'avons expliqué précédemment (§ 4), on avait eu soin d'établir l'axe longitudinal, au début du fonçage, à $0^m,10$ vers l'ouest de la position indiquée au projet; la déviation du caisson vers l'est a donc dépassé de $0^m,03$ seulement les prévisions.

§ 7. *Bétonnage de la chambre de travail.* — Le fonçage du caisson étant terminé, on a procédé au bétonnage de la chambre de travail. Le béton était composé de 2 volumes de mortier pour 3 volumes de galet de la plage de Dieppe; le galet, malgré ses formes arrondies, fait d'excellentes maçonneries. Le mortier était lui-même formé de 350 kilogrammes de ciment de Portland par mètre cube de sable de mer. Il était fabriqué au moyen d'une turbine à axe vertical actionnée par une locomobile. Ces appareils sont aujourd'hui d'un usage

---

s'expliquer sans admettre une certaine élasticité dans le béton. Bien que nous ayons reconnu par des expériences directes que des poutres en béton, chargées en leur milieu, prennent une flèche assez notable avant de se rompre et que d'autre part les constatations relatives aux niveaux successifs atteints par les tranchants aient été très sérieusement faites, les résultats ci-dessus mentionnés nous inspirent quelque défiance et nous les donnons sous toutes réserves.

courant sur les grands chantiers. Quant au béton, il était confectionné au rabot, à la main, auprès de l'écluse à air par laquelle il devait être introduit dans le caisson. Trois écluses étaient généralement en service pour le bétonnage.

La composition du chantier était alors la suivante :

	Chefs d'équipe.	Ouvriers.
Fabrication du mortier, pour les trois écluses . .	1	11
Approche des matériaux, galet et mortier servant à la confection du béton pour les trois écluses.	1	17
Fabrication du béton et jet dans les écluses, pour chaque écluse 5 ouvriers, soit pour trois écluses.	»	15
Emploi du béton (éclusée, descente, jet en place et pilonnage), par chantier, 1 chef d'équipe et 5 ouvriers, soit pour trois écluses.	3	15

Le nombre total des ouvriers était ainsi pour trois écluses de 61 non compris deux surveillants, l'un à l'extérieur, l'autre dans la chambre de travail. Ces chiffres correspondent à une équipe; le nombre d'ouvriers employés était, en réalité, double, puisqu'ils se relayaient de six heures en six heures.

Le cube total de béton mis en place étant de 1.927 mètres cubes et la durée du bétonnage ayant été de seize jours (5 au 21 juin), le cube moyen exécuté par jour ressort à 120 mètres cubes, soit 40 mètres cubes par écluse; mais il y a eu quelques interruptions de travail résultant de l'envahissement des chambres par l'eau. Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment (§ 6, p. 565), les couteaux ne se trouvant pas suffisamment engagés dans le terrain, une fois le règlement du fond de la fouille terminé, les pertes d'air ont été en croissant, et les trois machines locomobiles, actionnant les pompes à air, sont devenues insuffisantes pour refouler l'eau à haute mer. Au lieu de diminuer, comme il était naturel de le supposer, à mesure que le bétonnage avançait et que, par con-

séquent, les dimensions de la chambre à remplir se réduisaient, les pertes n'ont fait qu'augmenter de jour en jour, et il a fallu se résoudre à installer une quatrième machine pour terminer l'opération. On a ainsi perdu une journée entière pour l'installation, après avoir perdu, pendant plusieurs jours, un certain nombre d'heures en tâtonnements. On avait essayé notamment de mettre la chambre de travail en communication directe avec l'extérieur au moyen d'un tuyau, espérant que l'eau, refoulée par l'air, s'échapperait par le tuyau plus vite qu'elle ne reviendrait par le dessous des couteaux; cette tentative n'a pas réussi. En réalité, dans des conditions normales, on pourrait arriver à couler 80 mètres cubes de béton par journée de vingt-quatre heures au moyen d'une seule écluse bien servie.

Le bétonnage d'une chambre de travail est toujours une opération très délicate; il est difficile de bourrer le béton de manière à ne laisser aucun vide, fût-il d'un millimètre, sous la tôle du plafond, et, ce résultat serait-il atteint, on craint généralement que par suite de son retrait, le béton cesse de remplir exactement la chambre, une fois la dessiccation opérée. Nous croyons que ces craintes sont exagérées. Dans l'espèce, nous avons fait bourrer le béton sous la tôle du plafond au moyen de longues perches terminées en biseau, et cette simple précaution a suffi pour constituer un massif que nous devons supposer être absolument plein, étant donnée l'étanchéité constatée lors de l'achèvement du radier, malgré une sous-pression d'une dizaine de mètres. Nous avons reconnu, d'ailleurs, par une expérience directe qu'un massif de béton bien pilonné, d'une hauteur d'un mètre environ, ne subit, en se desséchant, aucun retrait vertical *appréciable*.

Après le bétonnage de la chambre de travail, on a procédé à la fermeture des cheminées, opération exigeant

du soin en raison de ce que quelques-unes d'entre elles débouchaient sous le radier. Les cheminées étaient remplies de béton jusqu'à $0^m,80$ environ au-dessus du plafond, puis fermées au moyen d'un tampon en bois de $0^m,08$ d'épaisseur (en madriers jointifs); le tampon avait un diamètre inférieur de $0^m,03$ à celui de la cheminée et l'intervalle annulaire compris entre le périmètre du tampon et la tôle était bouché au moyen d'une série de coins en chêne jointifs ayant $0^m,015$ d'épaisseur, enfoncés au marteau; le bois gonflait sous l'influence de l'humidité et formait une fermeture hermétique sur laquelle on coulait encore une couche de $0^m,50$ de béton de gravier confectionné avec un mortier énergique, dosé à 500 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable. On maintenait d'ailleurs la pression de l'air dans l'écluse pendant plusieurs heures pour laisser au béton le temps de durcir. Une fois la prise faite, on pouvait laisser tomber la pression sans que l'eau pénétrât dans la cheminée; l'obturation était complète. Pour deux cheminées seulement sur douze, l'opération n'a pas complètement réussi, et l'eau, se frayant un passage le long des tôles de la chambre de travail, montait peu à peu dans la cheminée quand on cessait d'y envoyer de l'air comprimé. Ces filtrations, d'ailleurs peu importantes, n'ont présenté aucun inconvénient, en raison de ce que les deux cheminées dont il s'agit devaient être noyées dans les massifs des bajoyers.

Les cheminées correspondant au radier ont été déboulonnées à partir du niveau du dessus des poutres, soit à $2^m,20$ environ, au-dessus du plafond de la chambre de travail; celles correspondant aux bajoyers et noyées dans les maçonneries ont été dérasées à la cote $(0^m,50)$ environ.

III.

MAÇONNERIES EN ÉLÉVATION

§ 1er. *Dispositions générales.* — Avant d'entrer dans le détail de la construction de l'écluse au-dessus de la chambre de travail du caisson, nous devons dire quelques mots des dispositions générales adoptées pour les maçonneries.

Les mortiers ont été uniformément dosés à 400 kilogrammes de ciment de Portland pour un mètre cube de sable de mer pour les maçonneries de granit et de briques; toutefois le dosage a été porté à 500 kilogrammes pour le revêtement du radier.

Dans les bétons, on a admis généralement un dosage de 400 kilogrammes qui a été réduit à 300 kilogrammes à partir de la cote ($2^m,50$); le dosage avait été de 500 kilogrammes au-dessus de la chambre de travail, sur la hauteur des poutres armant le plafond de cette chambre.

Les mortiers étaient confectionnés au moyen d'une turbine à axe vertical actionnée par une locomobile.

Le granit provenait des carrières de Diélette (Manche). On a employé, pour les parements, la brique dure du Havre sur une épaisseur moyenne de $\frac{0^m,11 + 0^m,22}{2}$, soit $0^m,165$, et la brique du pays en arrière sur une épaisseur moyenne de $\frac{0^m,165 + 0^m,405}{2}$, soit $0^m,285$.

Les bétons étaient composés de deux parties de mortier pour trois parties de galet de mer ayant la grosseur des cailloux de routes, et confectionnés dans les bétonnières cylindriques en tôle, garnies de barres transversales, couramment usitées sur les chantiers.

L'exécution des maçonneries à l'air libre dans le caisson

a présenté de sérieuses difficultés, en raison des sujétions nombreuses auxquelles on était soumis.

D'une part, il fallait éviter que l'ensemble du caisson ne pût se soulever par l'effet de la sous-pression, et l'on devait, par suite, au moins sur une certaine hauteur à partir du radier, élever les maçonneries par parties, au fur et à mesure que l'on vidait les cases remplies des galets formant surcharge; on ne pouvait donc établir qu'un chantier très restreint.

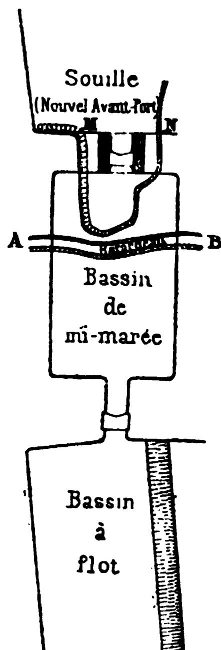
Ce chantier était, d'autre part, encombré par l'immense charpente à mailles très serrées contre-boutant les parois en tôle du caisson; il était impossible de déplacer aucune pièce sans l'avoir remplacée provisoirement par une ou deux autres disposées de manière à ne pas gêner le travail des maçons. Si l'on considère que toutes les pièces inférieures de la charpente, aussi bien transversales que longitudinales, étaient soumises à d'énormes pressions, que la moindre fausse manœuvre pouvait amener la déchirure des tôles de 3 à 5 millimètres formant parois, par suite, causer l'envahissement du caisson par les eaux, et compromettre le succès, on comprend facilement avec quelles précautions extrêmes l'opération a dû être conduite et quelle lourde responsabilité pesait sur le conducteur des travaux de l'entreprise.

La marche la plus rationnelle à suivre consistait à élever tout d'abord l'un des bajoyers par parties successives, puis le second, et ensuite le radier, parties amont et aval en réservant pour la fin, c'est-à-dire pour le moment où presque tous les étaiements auraient disparu, la partie centrale correspondant au busc, formé de pierres de taille très volumineuses devant être placées avec une extrême précision.

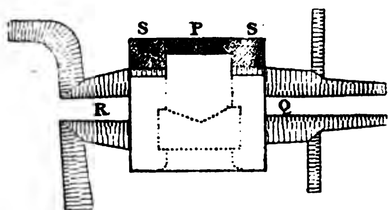
La première partie de ce programme a dû être un peu modifiée en raison de circonstances que nous devons expliquer ici.

Le nouveau bassin à flot et la première moitié du bassin de mi-marée ont été construits à l'abri d'un bâtardeau (AB) qui les isolait de la souille de la retenue.

L'écluse d'aval du bassin de mi-marée ainsi que ses murs en retour (MN) côté de la souille, devaient être commencés peu après les bassins, et terminés bien avant les travaux projetés à l'abri du bâtardeau (AB) ; dans cette hypothèse, on aurait, pour achever le bassin de mi-marée, supprimé le bâtardeau (AB) qui se serait trouvé remplacé par les murs en retour, et la face Nord du caisson consolidée au moyen de fermes en charpente horizontales superposées reportant la pression sur les bajoyers de l'écluse. Malheureusement, les prévisions n'ont pu se réaliser ; les travaux des bassins ont avancé rapidement alors que les constructeurs retardaient la livraison du caisson, si bien que tous les ouvrages au Sud du bâtardeau (AB) étaient finis au moment où l'on terminait le fonçage du caisson et alors que les murs en retour (MN) dont le projet n'avait pas été immédiatement approuvé par l'administration n'étaient même pas commencés. Pour ne pas arrêter les travaux des entrepreneurs du bassin de mi-marée et leur permettre d'achever les murs et le creusement de ce bassin, on dût constituer immédiatement, au droit de l'écluse d'aval, un bâtardeau capable de remplacer le bâtardeau (AB) et, à cet effet, réunir le caisson aux terre-pleins voisins par des bâtardeaux (QR) formés d'un noyau en terre glaise pilonnée dans un encoffrement et recouvert de remblais, —



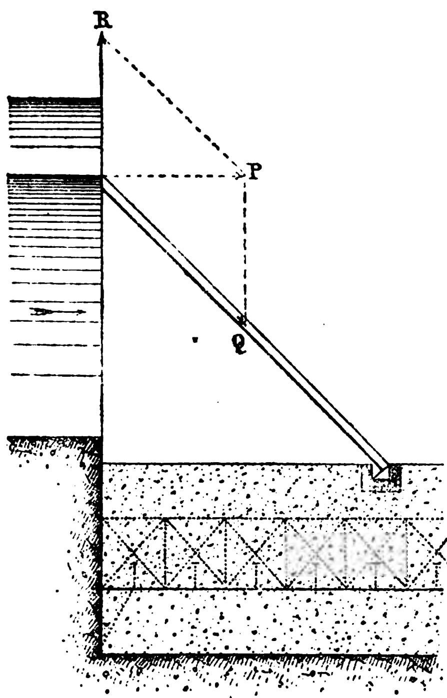
monter d'urgence les deux musoirs Nord des bajoyers de l'écluse (S) et consolider la paroi du caisson, au droit de l'ouverture (P), c'est-à-dire dans l'intervalle des têtes, par un bâtardeau. On a formé ainsi au Nord des ouvrages une sorte d'enceinte continue RSPSQ capable de résister à la pression des eaux de la souille et l'achèvement du bassin de mi-marée n'a été que fort peu retardé.



§ 2. *Tête nord de l'écluse et bâtardeau* (Pl. 46). — A la tête nord de l'écluse, les musoirs des bajoyers Est et Ouest ont été montés successivement. Après avoir vidé les compartiments remplis de galets correspondants, lesquels mesuraient 12^{m},80 de longueur sur 11^{m},40 et 12^{m},40 de largeur, on a élevé les maçonneries par assises horizontales d'environ un mètre de hauteur et par gradins jusqu'à la cote (7^{m},50), correspondant au niveau ordinaire des eaux dans la souille à pleine mer. A cette cote, une plate-forme de 3^{m},50 de largeur a été établie. Au fur et à mesure qu'on mettait en place une nouvelle couche de béton, les pièces de charpente longitudinales et transversales correspondant à cette couche étaient coupées, après avoir été buttées par des contre-fiches, sur la couche précédente. Les deux musoirs une fois montés, la portion du radier comprise entre eux a été achevée; c'est dans cette portion que sont situées les deux rainures de 0^{m},60/0^{m},60 projetées pour le passage en siphon des tuyaux de canalisation d'eau.

On a pu procéder alors à la construction du bâtardeau destiné à consolider la paroi en tôle du caisson au droit du pertuis de l'écluse. Cette paroi Nord se trouvait con-

tre-boutée à la paroi opposée par l'intermédiaire de la charpente longitudinale du caisson; mais une fois les épuisements commencés dans la portion restant à exécuter du bassin de mi-marée, les eaux devaient cesser d'exercer sur la paroi Sud du caisson. la pression qui équilibrait celle à laquelle était soumise la paroi Nord; il devenait donc indispensable que cette paroi devînt ri-



gide, autrement dit qu'elle pût, en quelque sorte par ses propres moyens, soutenir la pression des eaux de la souille. Pour atteindre ce résultat (sans prendre de points d'appui sur les bajoyers qui n'étaient pas encore montés), le moyen le plus simple paraissait être, au premier abord, d'établir tout le long de la paroi deux ou trois séries de

contre-fiches en charpente, inclinées à 45°, dont le pied serait arrêté par les rainures du radier. Au point de vue de l'installation et de l'achèvement ultérieur, cette solution était toute naturelle; mais, en l'examinant de plus près, on ne tardait pas à reconnaître que la poussée exercée par les eaux de la souille produirait une composante verticale (R) à laquelle la tôle, relativement mince formant paroi, serait incapable de résister, et qu'on ne pouvait éviter le déchirement de cette tôle, sans constituer en arrière un massif de maçonnerie dont le poids viendrait réduire l'effort de traction vertical qu'il fallait absolument amener à 3 kilogrammes ou 4 kilogrammes au plus par millimètre carré, étant donné l'état de la tôle et les conséquences désastreuses qu'aurait amenées une rupture.

En se plaçant dans cet ordre d'idées, on a été conduit à constituer le bâtardeau de la manière suivante :

Les trois fermes, très légères, en tôle, reliant la paroi verticale Nord du caisson aux poutres du plafond, ont été réunies par dix cours de poutrelles horizontales sur lesquelles on a boulonné perpendiculairement de fortes pièces de sapin de 0,30/0,30 à 0,32/0,32 d'équarrissage, espacées de 1^{m},50 d'axe en axe; chacune de ces pièces a été contre-boutée par deux étais ayant leur pied engagé dans la deuxième rainure du radier. On a ensuite appliqué contre la paroi un massif en béton assez maigre (formé avec du mortier dosé à 300 kilogrammes seulement par mètre cube de sable), ayant 1^{m},50 d'épaisseur au sommet et 5 mètres d'épaisseur à la base. La zone du radier correspondant à ces 5 mètres, a été faite complètement en béton, sans revêtement en briques, dans le double but de permettre une meilleure liaison pendant la durée du bâtardeau, et d'obtenir une surface de radier plus régulière après le dérasement sous l'eau de la base de cet ouvrage, dérasement qui n'aurait pu se faire sans

casser un grand nombre de briques du revêtement. Entre les parements des musoirs des bajoyers et le béton du bâtardeau, on a interposé des feuillets de sapin, de manière à empêcher toute adhérence et permettre la démolition sans détériorer les parements.

Le bâtardeau mixte ainsi formé de tôles, charpente de sapin et béton, devait facilement résister à la poussée, dans les conditions de charge les plus défavorables.

L'expérience a d'ailleurs confirmé les résultats des calculs ; le bâtardeau s'est parfaitement comporté ; il est resté en place pendant trois ans, sans qu'il se soit produit ni filtration ni mouvement. Il a été enlevé après l'achèvement de l'écluse et de ses accessoires, ainsi qu'il est expliqué plus loin.

Les musoirs et le bâtardeau une fois établis, la paroi aval du caisson était en état de résister à la poussée des eaux par ses propres moyens, et l'on pouvait sans danger couper, au fur et à mesure des besoins, les étais longitudinaux qui ne servaient plus qu'à établir des liaisons entre les étais transversaux.

§ 3. *Bajoyers et radièr*. — On s'est alors occupé de l'achèvement des deux bajoyers. Les cloisons séparatives des compartiments à l'est avaient été disposées de manière que deux compartiments de l'Ouest et deux de l'Est comprissent l'emplacement de la portion des bajoyers restant à construire en amont des musoirs sur une largeur correspondant à l'épaisseur de ces bajoyers et en plus à une amorce du radier.

Du côté de l'est, l'opération a été délicate et difficile, comme l'élévation des musoirs. Chacun des étais transversaux du caisson servant à contre-bouter les parois en tôle fortement serrées par les bâtardeaux en terre appuyés aux faces ouest et est de l'ouvrage, supportait une pression considérable ; on ne pouvait couper une pièce

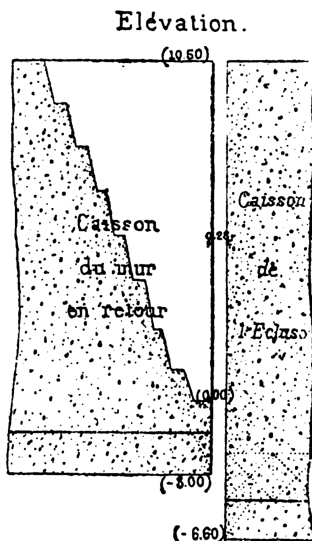
avant de l'avoir remplacée par d'autres. Les modifications successives apportées à l'étrésillonnement étaient accompagnées de craquements dans les bois, de gondolements dans les tôles du caisson qui n'avaient rien de bien rassurant, et il a fallu des précautions infinies pour éviter des déchirures et, par suite, des afflux d'eau qui auraient produit tout au moins un grand trouble dans les travaux.

Du côté de l'Ouest, les travaux ont été plus faciles. La paroi est du caisson se trouvait soutenue par le bajoyer déjà monté, et résistait ainsi par ses propres moyens ; les étais transversaux ne servaient plus qu'à contre-bouter la paroi du caisson correspondant au bajoyer que l'on élevait, de sorte que les déplacements de ces étais présentaient de moindres dangers.

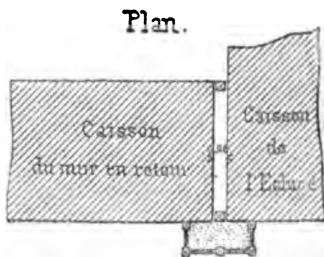
En somme, les deux bajoyers ont pu être élevés successivement jusque vers la cote ($4^m,75$) sans accident ; au-dessus de cette cote, toute crainte avait disparu, les poussées latérales contre les parois du caisson étaient relativement faibles, les étais moins nombreux, les mouvements des ouvriers plus libres ; on se trouvait ramené à des conditions qui se rencontrent fréquemment dans les travaux.

Tous les bois qui encombraient le fond de l'écluse ayant pu être enlevés après la construction du bâtardeau de tête et des bajoyers, le radier et notamment le busc a été construit dans d'excellentes conditions. On n'a eu de difficultés sérieuses à vaincre que pour barder quelques pierres de taille d'un volume considérable, telles que les bourdonnières des portes d'èbe et des portes-valets et la pointe du busc (leur poids variait de 5 à 11 tonnes); on a pu les faire descendre au moyen de plans inclinés en charpente appuyés sur les maçonneries montées par redans, des bajoyers, et passer à travers les étais convenablement déplacés à cet effet.

§ 4. *Jonction des bajoyers avec les murs en retour.* — La jonction avec les bajoyers des murs en retour de l'écluse, côté Sud, a été faite très aisément, ces murs étant construits *à sec*, à l'abri du bâtardeau d'enceinte du bassin de mi-marée reporté en R S P S Q, ainsi qu'il a été expliqué ci-dessus. Une fois les fouilles de fondation des murs en retour parvenues à profondeur définitive, on a enlevé les tôles du caisson pour mettre à nu le béton des bajoyers sur la largeur correspondant au profil du mur; le béton a été repiqué soigneusement, refouillé même suivant une rainure verticale de $1^m,50$ de largeur sur $0^m,30$ de profondeur, et les maçonneries nouvelles ont été soudées aux anciennes.



Plan.



Du côté nord, la jonction était une opération beaucoup plus délicate. Les murs en retour Est et Ouest avaient été construits chacun dans un caisson de 25 mètres de longueur et de $6^m,30$ de largeur, foncé à l'air comprimé et descendu jusqu'à la cote ($-3^m,00$). Ces petits caissons, placés à $0^m,20$ de distance du grand caisson de l'écluse, s'en étaient éloignés pendant le fonçage ; la distance se trouvait portée à la fin de l'opération à $0^m,36$ du côté de l'Est et à $0^m,28$ du côté de l'Ouest. Les

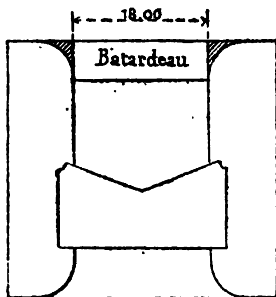
murs en retour Sud étant bien reliés à l'écluse, et, d'autre part, le bâtardeau (R Q) appuyé contre la partie centrale du grand caisson étant assez étanche, la jonction parfaite des murs en retour Nord avec les bajoyers n'était pas indispensable pour empêcher les communications entre le bassin de mi-marée et l'avant-port. Aussi s'est-on contenté de prendre les dispositions suivantes : Des pieux ont été battus aussi profondément que possible aux deux extrémités des intervalles compris entre le grand et les petits caissons, de manière à masquer complètement ces intervalles ou tout au moins à y comprimer le terrain pour diminuer sa perméabilité. Les maçonneries des murs en retour et des bajoyers ont été ensuite soudées à partir de la cote ($0^m,00$). A cet effet, les murs avaient été montés en gradins à partir de cette cote, dans la portion joignant l'écluse. On a établi de petits bâtardeaux formés d'un corroi de glaise maintenue dans une enceinte de pieux et palplanches, devant les intervalles libres des caissons. Il a été alors facile d'épuiser dans l'espace compris entre chacun des bajoyers de l'écluse et les gradins du mur contigu, d'enlever les tôles des caissons correspondant au profil de ce mur et de souder les maçonneries.

§ 5. *Démolition du bâtardeau.* — Une fois les maçonneries terminées, les portes et les vannes des aqueducs mises en place, les tuyaux de conduite des eaux posés et maçonnés dans leurs rainures, il a fallu songer à démolir le bâtardeau fermant l'ouverture de l'écluse pour la mettre en service. Cette opération a été longue et pénible; elle mérite que l'on s'y arrête quelque peu.

Nous n'avons pas besoin de rappeler que le bâtardeau dont il s'agit était constitué par un massif de béton appliqué contre la paroi nord du caisson, qu'on avait incorporé dans ce massif les fermes verticales en fer reliant

les poutres du plafond aux hausses et que l'ensemble était consolidé par des fermes en charpente dont le pied venait se butter dans l'une des rainures du radier. Le bâtardeau avait sa base sur le radier à la cote (— 1^{m},00) et s'élevait jusqu'au bord supérieur des tôles (10^{m},00).

On a dû tout d'abord, lors du remplissage de la rainure du radier qui servait de buttée, modifier un peu le pied des fermes et leur donner comme appui une pièce de bois fixée sur le radier par des boulons formés de de deux parties : l'une inférieure scellée dans le radier, sans faire saillie au-dessus de lui, de manière à pouvoir y être laissée sans inconvénient ; l'autre supérieure, vissée dans la première et pouvant être facilement démontée au scaphandre. Cela fait, on a démoli à sec les deux extrémités est et ouest du bâtardeau sur toute la longueur (2^{m},50 environ de chaque côté), correspondant à la partie courbe des musoirs, de manière à ne laisser debout le bâtardeau que sur la longueur de 18 mètres correspondant à l'ouverture de l'écluse. Cette démolition des extrémités s'est effectuée très aisément, en opérant absolument comme si l'on avait creusé un puits vertical d'une section à peu près triangulaire limitée d'un côté à la paroi en tôle du caisson, de l'autre à la portion du massif du bâtardeau conservée, et du troisième côté au parement curviligne du musoir du bajoyer. Au fur et à mesure du creusement, la paroi en tôle, renforcée par de poutrelles, était solidement contre-boutée par des petits étais appuyés sur le parement du musoir. On a ensuite réduit à 4 mètres la largeur maximum du bâtardeau, en recoupant un mètre à sa base sur toute la largeur de l'écluse.



Les appareils d'épuisement des bassins ont alors été arrêtés; l'eau y est montée peu à peu, et quand elle s'est élevée à 3 mètres environ au-dessus du radier, on a démonté toute la charpente des fermes consolidant le bâtardeau.

Ces opérations terminées, il restait à enlever un massif ayant 18 mètres de longueur (ouverture de l'écluse), 11 mètres de hauteur, $1^m,50$ de largeur au sommet et 4 mètres à la base, comprenant de la maçonnerie de béton, des fers et des bois. Les eaux continuant à s'élever lentement ($0^m,12$ par jour) dans les bassins et, par suite, le long de la face Sud du bâtardeau, on a eu le temps de démolir à sec, au-dessus de l'eau, toute la partie supérieure par les procédés ordinaires. On est descendu ainsi jusqu'à la cote ($4^m,20$) que les eaux du bassin ont atteinte quelques jours après.

Arrivé à cette cote, les eaux de la retenue (par conséquent de la mer) n'étaient plus soutenues que par la paroi en tôle de la partie supérieure du bâtardeau, paroi consolidée par quelques pièces de charpente arc-boutées sur la partie supérieure non encore démolie du massif. On s'était arrangé pour ne pas laisser monter les eaux de la retenue au-dessus de la cote ($8^m,00$) pendant la démolition, et jusqu'à cette cote la paroi s'était bien comportée; mais on voyait qu'on était arrivé à l'extrême limite de sa résistance et qu'il ne serait pas prudent de descendre plus bas. On a mis alors les bassins en communication directe avec la retenue, en enlevant quelques tôles de la paroi du caisson, et le restant du massif de la cote ($-1^m,00$) à la cote ($4^m,20$), soit sur $5^m,20$ de hauteur, a dû être démoli au moyen d'un caisson mobile, dans l'air comprimé.

1° *Dispositions du caisson mobile.* — Le caisson mobile employé mesurait 5 mètres de longueur sur 4 mètres de largeur; la chambre de travail avait $2^m,20$ de hauteur.

Elle était consolidée latéralement par des contre-fiches espacées de 1 mètre en moyenne d'axe en axe qui réduisaient à 2 mètres la portée du plafond. Le plafond était armé de poutres de $0^m,50$ de hauteur correspondant aux contre-fiches et par conséquent ayant le même espacement. Le caisson portait en son centre une écluse à air du type précédemment employé pour le grand caisson de l'écluse; la cheminée avait $0^m,70$ de diamètre.

On munissait le caisson mobile de hausses sur une hauteur allant en croissant au fur et à mesure de l'enfoncement, de manière que le bord supérieur émergeait toujours de l'eau; mais cette disposition n'a eu d'autre but que de rendre le périmètre du caisson bien apparent à l'extérieur, afin d'opérer les manœuvres de jour et de nuit avec plus de sécurité. Une ouverture de $0^m,50/0^m,50$ (que l'on pouvait fermer au besoin par un clapet), pratiquée dans l'une des hausses, immédiatement au-dessus des poutres du plafond, permettait à la mer de jouer librement au-dessus de la chambre de travail.

Le poids propre du caisson jusqu'au niveau du dessus des poutres du plafond était de 7.000 kilogrammes; chaque hauteur de 1 mètre de hausses augmentait ce poids de 1.040 kilogrammes. L'écluse à sas et la cheminée pesaient environ 5.000 kilogrammes. L'eau, pénétrant librement au-dessus du plafond, la sous-pression, en marche, était constante, quelle que fût la profondeur; elle correspondait au cube d'eau capable de remplir la chambre de travail, soit à $20^{mq} \times 2^m,20 = 44^{mc}$. En chargeant au moyen de gueuses et de galet le dessus du plafond d'un poids de 36 tonnes environ, le poids total du caisson et de sa surcharge, soit 50 tonnes, dépassait de 6 tonnes la sous-pression; on avait ainsi une stabilité suffisante.

Le caisson était tenu suspendu au moyen de 4 vérins à vis capables chacun d'un effort de 15 tonnes. Le noyau

des tiges filetées de ces vérins mesurait $0^m,065$ de diamètre ; les filets avaient $0^m,0075$ de largeur et d'épaisseur. Les vérins étaient portés par un bâti en charpente reposant sur deux groupes de six rouleaux en bois de $0^m,15$ de diamètre pouvant se mouvoir perpendiculairement à l'axe de l'écluse sur des passerelles disposées le long de la face amont et de la face aval du bâtardeau. Les vérins et les rouleaux étaient actionnés à la main au moyen de simples leviers en fer. Il est clair qu'en combinant le mouvement des rouleaux avec celui des vérins, on pouvait amener le caisson en un point quelconque du bâtardeau. On avait d'ailleurs soin de n'effectuer les mouvements que quand la chambre de travail était pleine d'air comprimé. Le caisson était alors soulagé de 44 tonnes et la charge sur les vérins et les rouleaux devenait très faible ; 12 hommes et au besoin 8 suffisaient pour une manœuvre complète (déplacements horizontal et vertical); en une demi-heure au plus on pouvait soulever le caisson de $0^m,50$ et le riper de sa longueur.

2° *Air comprimé.* — Le matériel employé pour la production de l'air comprimé comprenait une locomobile de 15 chevaux (plus puissante qu'il n'était nécessaire), actionnant directement une pompe à air horizontale à deux corps accouplés, identique à celles qui avaient servi lors de la construction de l'écluse. On se rappelle que ces pompes avaient $0^m,50$ de course et engendraient un volume de $2 \times 0,024$, soit $0^m,048$ par coup de piston (*).

Pendant toute la durée de la démolition, le nombre des coups de piston est resté à peu près constant, oscillant autour de 23 par minute, bien que la charge sur les couteaux passât progressivement, à mesure de la descente

(*) Pendant la durée de la démolition, le niveau des eaux dans la Retenue variait généralement à chaque marée de la cote $(5^m,50)$ à la cote $(7^m,25)$; il a atteint exceptionnellement $(8^m,30)$ et $(8^m,80)$.

du caisson mobile, de $1^m,25$ à $6^m,50$ d'eau à basse mer et de 3 mètres à $8^m,25$ à haute mer.

En admettant pour la pompe, comme nous l'avons fait précédemment (p. 565), un rendement de 75 p. 100, le volume d'air comprimé envoyé dans la chambre de travail, à haute mer, était par minute d'environ

$$23^t \times 0,75 \times 0^{mc},048 \times \frac{1}{1,3} = 0^{mc},64,$$

au début de la démolition et

$$23^t \times 0,75 \times 0^{mc},048 \times \frac{1}{1,8} = 0^{mc},46.$$

à la fin, correspondants respectivement à 38 mètres cubes et 27 mètres cubes par heure. On voit, ce qui était facile à prévoir, que le volume d'air à envoyer dans la chambre pour la tenir à sec, diminue quant à la profondeur à laquelle sont descendus les couteaux augmente, c'est-à-dire au fur et à mesure que l'air a à traverser, pour s'échapper de la chambre , une couche d'eau plus épaisse.

Il est intéressant de comparer le volume d'air envoyé par heure à la capacité de la chambre de travail (44^{mc}), et au périmètre du caisson (18 mètres linéaires). En se reportant aux observations précédemment dévoloppées (p. 565), on voit que la dépense en air comprimé est proportionnellement plus forte quand le caisson est suspendu dans l'eau que quand ses couteaux sont engagés dans un terrain de sable et gravier, mais que la différence devient peu considérable dès que la profondeur d'eau augmente.

3° *Exécution des déblais.* — On a démoli le bâtardeau en procédant par tranches horizontales de $0^m,50$ de hauteur, sur les deux premiers mètres ($4^m,20$) à ($2^m,20$) ; puis on a enlevé en deux couches de $1^m,60$ chacune les $3^m,20$ de hauteur restants. Le caisson, qui avait 4 mètres de largeur, tandis que l'épaisseur du bâtardeau ne dépassait pas $2^m,50$ à la cote ($4^m,20$), ne reposait que par deux côtés du rectangle de base de la chambre de travail ; il se trouvait

donc en porte-à-faux au début de 4m,00 — 2m,50, soit près de 1m,50 sur la face intérieure du bâtardeau, le couteau débordant sur la face extérieure (paroi en tôle du grand caisson) de quelque centimètres seulement.

La démolition de chaque tranche était opérée par les procédés ordinaires pour les bois, au moyen de dynamite pour les fers et les maçonneries de béton. Des trous de 0m,40 de profondeur étaient forés dans cette maçonnerie, à des distances variant de 0m,50 à 1 mètre d'axe en axe, et on y plaçait des charges variant de 50 à 150 grammes de dynamite. Le feu était généralement mis à un groupe de quatre trous au moyen de mèches de longueurs variables afin que les quatre coups fussent bien distincts. On s'est également servi, pour déterminer les explosions, d'un appareil électrique; mais, dans ce cas, on avait soin de ne faire partir qu'un seul coup à la fois. Après l'explosion, les ouvriers achevaient à la pioche la désagrégation des blocs de gros volume, et les déblais étaient montés au moyen de bennes, comme il a été expliqué à propos du grand caisson de l'écluse. On transportait les déblais à la décharge, à 30 mètres environ de distance, au moyen de wagonnets Decauville.

On a poursuivi le travail de démolition de jour et de nuit. Commencé le 20 septembre 1886, il a été terminé le 5 janvier 1887. Le volume total des maçonneries, fers et bois extraits étant de 302 mètres cubes, le cube moyen enlevé a été d'un peu moins de 3 mètres cubes par journée de vingt-quatre heures.

Chacune des deux équipes qui se relayaient comprenait un chef de chantier et huit ouvriers, savoir :

A l'intérieur du caisson. .	Déblai	3	ouvriers.
	Élévation.	2	—
	Remplissage des sas. .	1	—
A l'extérieur du caisson. .	Vidange des sas	1	—
	Transport et régalage.	1	—

Au chantier étaient en outre constamment occupés un charpentier, un forgeron et deux aides pour travaux accessoires, installations, démolition des bois et des fers et réparation du matériel. Le faible rendement s'explique par l'enchevêtrement des maçonneries, bois et fers, qui rendait tout travail continu et régulier impossible.

Nous devons signaler, en terminant, les dangers que présentait l'opération, en raison de ce que le caisson était plus large que le bâtardeau à démolir. Les couteaux correspondant aux deux grandes faces du caisson mobile n'étant par engagés dans la maçonnerie, l'eau fut rentrée presque instantanément dans la chambre de travail par les intervalles compris entre les couteaux et le bâtardeau, si la pression avait subitement diminué ; il aurait suffi, pour amener un désastre, que l'une des portes extérieures d'un sas à déblais fût ouverte par un ouvrier avant que la porte intérieure correspondante fût fermée. On a bien, au début, pour atténuer les conséquences qu'aurait eues cette fausse manœuvre, commencé à garnir de charpente l'intervalle dont il s'agit ; mais, pour être efficace, il eut fallu que la charpente fût installée très solidement et, pour que le travail ne fût pas gêné, qu'on la modifiât souvent. L'entrepreneur n'a pas voulu supporter ces sujétions, et il a fini par renoncer à la charpente. Les travaux se sont heureusement terminés sans accident.

Nous donnons au chapitre suivant quelques renseignements sur les dépenses.

IV

DÉPENSES.

A. — Quelques prix de revient.

Avant d'indiquer le chiffre des dépenses auxquelles a donné lieu l'exécution de l'écluse, nous pensons qu'il

n'est pas sans intérêt de fournir, d'après les constatations auxquelles il a été procédé en cours d'exécution, les prix de revient des divers travaux. Nous limiterons d'ailleurs notre étude à ceux se rattachant à l'emploi de l'air comprimé, tant pour les terrassements que pour les maçonneries.

§ 1er. *Frais généraux et matériel de l'entreprise.* — Les frais généraux de l'entreprise des terrassements et maçonneries peuvent être évalués à 73.000 francs, savoir :

1° Personnel (chef de service, employés, gardiens, pour une durée de travaux de deux ans) (*).	36.000 fr.
2° Atelier de réparations	9.600
3° Bureaux, magasins, abris (en charpente, supposés réduits à 25 p. 100 de leur valeur primitive)	6.000
4° Pertes d'intérêts sur le cautionnement et la retenue de garantie.	8.000
5° Frais divers (patente, frais d'adjudication, de voyage, de bureau, assurances, avances de fonds, etc.). . .	13.400
Total.	73.000 fr.

soit environ 10,5 p. 100 du montant des travaux à l'entreprise (701.000 francs). Ces 73.000 francs se répartissent à peu près de la manière suivante :

Travaux à l'air comprimé (506.700 francs).	53.000 fr.
Travaux à l'air libre (194.300 francs).	20.000
Total pareil.	73.000 fr.

Le matériel comprenait des apparaux qui ont été employés exclusivement aux ouvrages exécutés à l'air comprimé, et des apparaux qui ont servi à l'ensemble des travaux. Les dépenses correspondant à ce matériel peuvent être établies approximativement de la manière suivante :

(*) La durée des travaux n'aurait pas dépassé deux ans, s'ils n'avaient été suspendus par suite de circonstances spéciales.

APPARAUX	QUANTITÉS	PRIX de l'unité	PRIX TOTAL	INTÉRÊT et amortissement	A COMPTER
1° Matériel spécial à l'air comprimé.					
		fr.	fr.	p.100	fr.
Compresseurs	3	5 000	15.000	15	2.250
Ecluses à air	12	3.600	43.200	15	6.480
Cheminées de 0^m,60 à 0^m,70 de diamètre	150^m	80	12.000	15	1.800
Bétonnières	11	500	5 500	15	825
Locomobile de 18 chevaux	1	12.500	12.500	15	1.875
— 15 chevaux	1	10.000	10.000	15	1.500
Transmission de 35 mètres de longueur	1	1.200	1.200	50	600
Tuyaux en fonte	400^m	8	3 200	50	1.600
Tuyaux en caoutchouc	45^m	30	1.350	50	675
Seaux	30	15	450	100	450
Petit matériel (divers)	»	»	1.000	50	500
Totaux			105.400		18,555
2° Matériel ayant servi à l'ensemble des travaux.					
Locomobile de 18 chevaux	1	12.500	12.500	30	3.750
— 10 chevaux	1	8.000	8.000	30	2.400
Pompe centrifuge	1	1.000	1.000	30	300
— Letestu	1	900	900	30	270
Grue roulante	1	2.000	2.000	30	600
Voie Decauville	400^m	5,70	2.280	30	684
Plaques tournantes	12	95	1.140	30	342
Wagonnets	18	160	2.880	30	864
Rails ordinaires	500^m	12	6.000	30	1.800
Accessoires de la voie	»	»	1.500	30	450
Malaxeur	1	350	350	100	350
Bétonnières	2	250	500	50	250
Transmission	»	1.000	1.000	50	500
Cordages	»	2.000	2.000	100	2.000
Bacs en tôle	2	300	600	30	180
Canalisation pour l'eau	»	»	1.000	50	500
Forge et outils pour réparations	»	»	5.000	50	2 500
Treuils, chèvres, crics, bascules	»	»	1.150	30	345
Petit matériel (divers)	»	»	1.000	50	500
Totaux			50.800		18.585

Les 18.585 francs doivent être ainsi répartis :

Pour les travaux à l'air comprimé (506.700 fr.). . . . 13.435 fr.
Pour les travaux à l'air libre (194.300 fr.) 5.150

Total. . . . . 18.585 fr.

En partant de ces bases, on arrive aux dépenses totales suivantes :

1° Pour les travaux à l'air comprimé :

Frais généraux.	53.000 fr.
Matériel { 18.555 fr. / 13.435 fr. }	31.990
Total.	84.990 fr.

soit environ $\frac{84.990}{506.700}$ ou 17 p. 100 environ des dépenses,

Et 2° pour les travaux à l'air libre :

Frais généraux.	20.000 fr.
Matériel.	5.150
Total.	25.150 fr.

soit environ $\frac{25.150}{194.300}$ = 13 p. 100 environ des dépenses.

§ 2. *Prix du caisson mis en place*. — Nous comprenons dans ce prix la fourniture du caisson proprement dit, sa mise en place et celle des appareils accessoires et machines, la charpente servant à l'étrésillonnement des parois ainsi que celle des estacades qui ont servi à la fois de guides pour maintenir le caisson dans son emplacement et de ponts de service pour l'approche des matériaux et l'enlèvement des déblais.

Le poids des fers du caisson resté dans les maçonneries est de 502.000 kilogr. qui, à 0f,47 le kilogr. mis en place, donnent	235.940f,00	
Le poids des fers (hausses d'amont et d'aval) qui ont été enlevés est de 59 000 kilogr. ; ces hausses ont été réemployées ailleurs, nous les comptons à 0f,25 le kilogr., soit pour . . .	14.750f,00	
Total de la ferronnerie.	250.690f,00	250.690f,00
Le montage et démontage des cloches et cheminées, la mise en place et l'enlèvement des machines, voies, canalisations, ont coûté environ.		2.000f,00
A reporter.		252.690f,00

Report		252.690f,00
Les bois qui ont été employés à l'étrésillonnement du caisson et à la construction des estacades comprenaient des poutres et des madriers de sapin du commerce qui, mis en œuvre avec peu de déchet et en évitant les entailles pour assemblage, ont perdu une faible partie de leur valeur et ont pu être soit revendus, soit réemployés. Le démontage successif des étrésillonnements a été l'une des sujétions les plus onéreuses de l'entreprise lors de l'élévation des maçonneries, et il en est tenu compte dans les prix correspondants au béton et à la maçonnerie de briques exécutés au-dessus du radier. La charpente mise en place à l'intérieur du caisson cubait 1.050 mètres cubes qui, à 30 francs le mètre cube, ont occasionné une dépense de	31.500f,00	
Celle des estacades et pont de service, 182mc.50 qui, à 35 francs le mètre cube (démontage compris), donnent. .	6.387f,50	
Total pour la charpente. . .	37.887f,50	37.887f,50
D'où, total général		290.577f,50
A ajouter pour frais généraux et matériel, 17 p. 100 sur 290.577f,50.		49.398f,18
Le caisson peut ainsi être évalué en totalité à. . . .		339.975f,68
Ce qui fait ressortir le mètre carré de surface de caisson à $\frac{339\,975^f,68}{1\,186}$, soit à		286f,65

§ 3. *Fourniture d'air comprimé.* — Pendant le fonçage, les frais de personnel, de combustible et d'entretien pour les machines soufflantes se sont élevés à la somme de 7.979f,80, soit 9.336f,36, si l'on ajoute les 17 p. 100 correspondant aux frais généraux et au matériel.

La durée du fonçage ayant été de 92 jours, soit 2.208 heures, la fourniture de l'air comprimé est ressortie pour une heure à $\frac{9.336^f,36}{2.208} = 4^f,23$.

Le cube extrait ayant été de 7.827 mètres, la fourniture de l'air comprimé est ressortie pour 1 mètre cube de déblais à $\frac{9.336,36}{7.827} = 1^{f},20$.

Pendant le bétonnage des chambres de travail, il a été dépensé pour fourniture d'air comprimé une somme de $1.852^{f},11$, frais généraux et matériel compris. Le cube de béton mis en place ayant atteint $1.927^{mc},50$, la fourniture de l'air comprimé est ressortie par mètre cube de béton à $\frac{1.852^{f},11}{1.927,50} = 0^{f},96$.

§ 4. *Charge artificielle du caisson.*— Le galet employé pour la charge artificielle ayant servi ultérieurement à la confection des maçonneries de béton, nous ne tiendrons compte que de la main-d'œuvre de mise en place et d'enlèvement.

La mise en place des 4.965 mètres cubes employés a coûté pour charge en wagonnet Decauville, transport à 200 mètres du dépôt au caisson, descente dans le caisson par un couloir, reprise en wagonnet, transport à 20 mètres dans l'encoffrement et régalage, $5.064^{f},30$, soit par mètre cube, frais généraux et matériel non compris, $1^{f},02$.

L'enlèvement des mêmes 4.965 mètres cubes a coûté pour charge, élévation dans des bennes mues par une locomobile, transport à la décharge en wagonnet à 200 mètres de distance et régalage, $9.681^{f},75$, soit par mètre cube $1^{f},95$.

La dépense totale afférente à la charge artificielle s'est donc élevée à $14.746^{f},05$, soit, y compris 17 p. 100 de frais généraux et matériel, à $17.252^{f},85$. Répartie sur les 7.827 mètres cubes de déblais exécutés pour le fonçage du caisson, la dépense correspondant à la charge artificielle ressort par mètre cube de déblai extrait à $2^{f},37$.

§ 5. *Extraction des déblais dans l'air comprimé.* — Pour l'extraction des 7,827 mètres cubes déblayés pendant le fonçage, il a été dépensé, frais généraux et matériel compris, une somme de 62.067f,50, soit par mètre cube de déblai 7f,92. Ces 7f,92 se décomposent de la manière suivante :

Pour fouille et charge dans la chambre de travail (éclairage compris)	3f,28
Pour élévation et sassement	2f,37
Charge en wagonnet, transport à 100 mètres et régalage.	1f,94
Surveillance et divers	0f,33
Total pareil	7f,92
Si l'on y ajoute :	
Pour fourniture d'air comprimé	1f,20
Pour charge artificielle	2f,37
On arrive à	11f,49

pour le prix de revient d'un mètre cube de déblais fouillés dans la chambre de travail, transportés à 100 mètres du caisson et régalés.

§ 6. *Béton mis en place dans l'air comprimé.* — Pour la fabrication et la mise en place des 1.927mc,50 de béton remplissant la chambre de travail, il a été dépensé, frais généraux et de matériel compris, une somme de 18.816f,66, soit, par mètre cube de béton, 9f,77.

Ces 9f,77 se décomposent de la manière suivante :

Pour fabrication du mortier (y compris fourniture du sable à 3f,80 le mètre cube, mais non compris la fourniture du ciment, livré par l'administration dans ses magasins).	3f,44
Pour fourniture de galet (à 2f,63 le mètre cube)	1f,97
Pour confection du béton, transport et jet dans la bétonnière de l'écluse à air	2f,67
Pour éclusée, mise en place, pilonnage	1f,69
Total pareil	9f,77
Si l'on y ajoute pour fourniture d'air comprimé	0f,96
On arrive à	10f,73

pour le prix de revient d'un mètre cube de béton mis en place dans la chambre de travail (non compris la fourniture du ciment). Le ciment revenant à l'administration à 57f,42 la tonne et le mortier étant dosé à 350 kilogrammes par mètre cube de sable, le prix du ciment entrant dans un mètre cube de béton est d'environ 10f,05 ; de sorte que le prix total d'un mètre cube de béton ressortirait à 20f,78.

§ 7. *Maçonneries au-dessus de la chambre de travail.* — Au point de vue des prix de revient des maçonneries exécutées au-dessus du plafond de la chambre de travail, à l'air libre par conséquent, l'écluse peut être divisée en trois zones bien distinctes :

La première, comprise entre le plafond et la cote (— 1m,50) environ, correspondant au béton mis en place avant le fonçage, alors que les charpentes étaient encore clairsemées dans le caisson et que les sujétions résultant de leur présence étaient insignifiantes ; dans cette zone, les prix de revient sont très sensiblement les mêmes que pour un grand ouvrage courant quelconque, la construction d'un mur de quai, par exemple.

La seconde zone, comprise entre la cote (— 1m,50) et la cote (+ 4m,75), correspondant aux maçonneries exécutées après le fonçage, avec les sujétions énormes résultant de la présence des étais qu'il fallait déplacer, consolider, enlever au fur et à mesure de l'avancement, dans les conditions les plus pénibles et les plus difficiles.

Enfin la troisième zone, comprise entre la cote (4m,75) et le couronnement de l'écluse, correspondant aux maçonneries exécutées, alors que la plupart des étais se trouvaient enlevés, les sujétions étant redevenues, comme pour la première zone, ce qu'elles sont dans la plupart des grands travaux courants.

1° *Béton.* — Dans la première zone, le prix du mètre

cube de béton mis en place (non compris la fourniture du ciment livré par l'administration dans ses magasins), ressort à 7f,82, frais généraux et de matériel compris, savoir :

Pour fabrication du mortier (compris fourniture du sable).	3f,32
Pour fourniture de galet	1f,90
Pour confection et emploi du béton.	2f,60
Total pareil.	7f,82

Dans la deuxième zone, les sujétions de toute nature résultant des étais augmentent le prix de revient du mètre cube de béton de 2f,97, ce qui fait ressortir le mètre cube à 10f,79. On voit que les sujétions dont il s'agit doublent et au delà le prix de confection et emploi et élèvent le prix total sensiblement au niveau de celui du béton employé dans l'air comprimé.

2° *Briques.* — Toujours dans la deuxième zone, le prix d'un mètre cube de maçonnerie de briques, non compris la fourniture du ciment ni celle de la brique, ressort à 16f,38, alors que dans des circonstances normales ce prix ne dépasse pas 9 francs environ. Si l'on déduit la valeur du mortier (2 francs environ), on voit que la façon proprement dite coûte sensiblement deux fois plus cher dans la deuxième zone que dans les ouvrages courants.

Pour avoir le prix de revient total de la maçonnerie de briques dans la deuxième zone (ciment toujours excepté), il faudrait ajouter :

Pour les briques du pays (600 briques à 32 francs le mille), 19f,20, ce qui donnerait un total de 35f,58,

Et pour les briques dures du Havre (600 briques à 57 francs le mille), 34f,20, ce qui donnerait un total de 50f,58.

Le ciment augmenterait ces deux derniers prix de 4 francs environ.

3° *Granit.* — Pour la maçonnerie de granit, il serait

intéressant de comparer le prix de revient de la mise en place des pierres de sujétion (bourdonnières, claveaux du busc), cubant chacune de 1 à 4 mètres cubes dans le radier de l'écluse d'aval (deuxième zone), avec l'embarras des étais, au prix de revient des mêmes pierres placées dans des circonstances normales, à l'écluse amont du bassin de mi-marée, par exemple. Nous n'avons malheureusement pas les éléments nécessaires pour faire une comparaison très exacte. Voici cependant quelques renseignements à ce sujet :

A l'écluse d'amont, le prix de revient *moyen* de bardage et pose, fourniture du mortier comprise, des pierres de sujétion du radier, ces pierres étant déposées à une cinquantaine de mètres de l'écluse, a été de $25^{f},50$ environ le mètre cube, frais généraux et matériel compris.

A l'écluse d'aval, le prix de revient *moyen* de bardage (distance analogue) et pose de pierres de granit employées dans la deuxième zone (radier et bajoyers) a été de $44^{f},35$; la moitié environ du cube total (103 mètres) correspond aux bajoyers, l'autre aux pierres de sujétion du radier. Pour quelques-unes d'entre elles (bourdonnières), le prix de revient s'est élevé à près de 100 francs. Pour l'ensemble des pierres de sujétion du radier, le prix moyen à comparer à celui de $25^{f},50$ doit être peu éloigné de 50 à 55 francs. Nous arriverions donc à ce résultat, pour les granits comme pour les briques et le béton, que la sujétion des étais de la deuxième zone a eu pour effet de doubler les frais de main-d'œuvre d'exécution des maçonneries.

§ 8. *Démolition du bâtardeau.* — 1re *partie, à l'air libre.* — Le cube de la portion du bâtardeau démolie à l'air libre (partie supérieure de la cote ($10^{m},00$) à la cote ($4^{m},20$) et des parties extrêmes latérales sur toute la hauteur du bâtardeau) est de 311 mètres.

Les dépenses, frais généraux et matériel compris, ont été les suivantes par mètre cube :

Installations, étaiement des tôles du caisson au fur et à mesure de l'enlèvement du massif de maçonnerie . . .	4^{f},20
Démolition et charge (main-d'œuvre).	11^{f},10
Élévation, transport horizontal à 50 mètres environ, déchargement et régalage.	5^{f},20
Fourniture et réparation d'outils.	3^{f},05
Total.	23^{f},55

— 2° *partie, à l'air comprimé.* — Le cube de la portion de bâtardeau démolie dans l'air comprimé à l'aide d'un caisson mobile est de 302 mètres, (partie inférieure de la cote (— 1^{m},00) à la cote (4^{m},20). On peut estimer à 25.000 francs environ la valeur du matériel (caisson mobile avec son écluse à sas, locomobile, compresseur) employé à cette démolition, et à 20 p. 100 environ des dépenses, les frais généraux et le matériel.

Les dépenses totales se sont élevées à 19.970 francs, soit à 23.964 francs en comprenant les 20 p. 100 pour frais généraux et matériel, le mètre cube de démolition ressort à $\frac{23.964}{302} = 79^{f},35$, qui se décomposent de la manière suivante :

Installations, ponts de service, montage, déplacements et démontage du caisson mobile.	14 ,30
Démolition proprement dite, compris éclairage (environ 2^{f},40 par mètre cube), dynamite (environ 2 francs par mètre cube), outils, transport des déblais à 50 mètres environ de distance.	54^{f},40
Fourniture d'air comprimé.	10^{f},65
Total pareil.	79^{f},35

L'élévation de ces prix s'explique, comme celle des précédents (à l'air libre), par ce fait qu'il s'agissait non pas de maçonnerie ordinaire, mais d'un mélange de bé-

ton, bois et fer à démolir par petites parties dans des conditions exceptionnellement difficiles.

B. — Dépenses totales.

Les dépenses payées par l'administration pour la partie de l'écluse située au-dessous de la cote (6^m,00), que l'on peut assimiler pour la Retenue à ce qu'est la cote d'étiage pour les rivières, s'élèvent à la somme de 793.985^f,04, savoir :

Travaux à l'entreprise (bâtardeau compris)	661.466^f,13
Fourniture de ciment (à 57^f,42 la tonne).	113.347^f,08
Dépenses en régie (surveillance des travaux et dépenses diverses)	19.171^f,83
Total pareil.	793.985^f,04

Le cube total des maçonneries de toute nature au-dessous de la cote (6^m,00) étant de 9.488^m,20, le mètre cube ressort à 83^f,68, soit, déduction faite du prix du ciment, à 71^f,74.

Les dépenses totales afférentes à la construction de l'écluse s'élèvent à la somme de 849.500 francs, savoir :

A l'entreprise	701.000 fr.	
En régie.	21.500	
Ciment.	127.000	
Total pareil.	849.500 fr.	849.500 fr.
Pour avoir le prix de l'écluse prête à fonctionner, il faut ajouter la valeur des organes accessoires, savoir :		
1° Une paire de portes en tôle galvanisée, chaque ventail étant formé de onze entretoises horizontales (y compris les supérieure et inférieure) et cinq entretoises verticales, y compris celles formant poteaux busqués et tourillon, et les van-		
A reporter.		849.500 fr.

Report	849.500 fr.
taux pesant environ 151 tonnes la paire, non compris 7 tonnes pour colliers, ancrages et pivots: A l'entreprise. . . . . 107.600 fr. En régie 6.000	113.600 fr.
2° Un appareil funiculaire d'ouverture et de fermeture des portes, actionné par l'eau comprimée, y compris dispositions pour assurer la manœuvre à bras, chaînes et poulies de renvoi, mais non compris la part proportionnelle de la machinerie centrale	27.900 fr.
3° Quatre ventelles en fonte destinées à fermer les aqueducs de $1^m,50$ de largeur sur 2 mètres de hauteur, avec appareils de manœuvre hydraulique et à bras (non compris la part proportionnelle de la machinerie centrale).	36.000 fr.
4° Deux cabestans hydrauliques à poupée différentielle, pouvant développer des efforts de 1 tonne et 2 tonnes avec des vitesses de $0^m,80$ et $0^m,40$ par seconde (non compris la part proportionnelle de la machinerie centrale).	12.400 fr.
5° Deux cabestans à bras.	1.500 fr.
6° Deux poulies de renvoi, etc.	900 fr.
7° Une passerelle roulante sur rails, pour piétons, formée d'une poutre centrale unique portant à droite et à gauche un trottoir de $1^m,25$ de largeur en encorbellement, et pesant 41 tonnes, y compris le lest.	12.000 fr.
8° Un appareil funiculaire de manœuvre de la passerelle, actionné par l'eau comprimée, compris voie de roulement et mécanisme de culasse (non compris la part proportionnelle de la machinerie centrale).	11.200 fr.
Total général des dépenses.	1.065.000 fr.

Le projet de construction de l'écluse a été dressé sous la direction de M. Bellot, ingénieur en chef, par M. Alexandre, qui a suivi les travaux successivement comme ingénieur ordinaire et comme ingénieur en chef. Les parachèvements des maçonneries et l'outillage de l'écluse

ont été exécutés sous sa direction avec la collaboration de M. Gérardin, puis de M. Colmet-Daâge, ingénieurs ordinaires. MM. le chef de section Foubert et le conducteur Gosset ont été chargés successivement de la surveillance des chantiers.

MM. Moreau et Montagnier, entrepreneurs, s'étaient rendus adjudicataires des maçonneries de l'écluse. M. Montagnier, assisté de son chef de service, M. Reynaud, a montré, une fois de plus, dans l'exécution de cet important ouvrage, sa haute compétence en matière de travaux dans l'air comprimé.

Dieppe, le 29 juin 1887.

TABLE DES MATIÈRES.

N° 64

NOTE

SUR LES

CABLES TRANSPORTEURS AÉRIENS

Système GOURJON

Par M. GROS, Ingénieur des ponts et chaussées.

1° *Objet.* — Les câbles porteurs aériens employés aux usines de la Porte-de-France et décrits dans les *Annales* de 1877, ont reçu de nombreuses applications. C'est ce qui nous engage à faire connaître un mode de transport aérien d'un genre différent, dont nous avons eu l'occasion de visiter dans notre arrondissement une application intéressante à l'exécution de travaux publics. Ce nouveau système, plus simple et plus économique que le précédent, peut suffire dans beaucoup de cas et rendre comme lui de grands services. Il a été imaginé par M. Gourjon (*), fabricant de chaux au Teil, qui l'emploie depuis 1884 dans son usine.

2° *Système de la Porte-de-France.* — Ce système, bien connu, est une extension ingénieuse du plan in-

(*) Brevet du 15 décembre 1884.

cliné, à double voie et à mouvement alternatif, au cas où le sol se dérobe et fait défaut pour l'établissement d'un plan fixe. Il comporte deux câbles fixes porteurs et un câble mobile de balance. Deux treuils sont nécessaires pour maintenir les câbles porteurs bien tendus. Il faut aussi, pour que le mouvement soit régulier, que le câble mobile ou tracteur soit sans fin, pour que ses deux brins s'équilibrent constamment, et, dans les installations importantes, que l'une des poulies de ce câble soit placée sur un wagonnet tenseur.

3° *Exemples.* — Comme exemple d'une installation importante de ce système, nous rappellerons celle de la Porte-de-France (*fig.* 1 et 2 de la pl. 47). La distance franchie est de 475 mètres, la descente de 350 mètres. La benne chargée pèse 1.200 kilogrammes. Le trafic journalier peut atteindre 120 tonnes ; l'installation a coûté 25,000 francs, et le transport d'une tonne revient à $0^{f},26$.

La partie montagneuse de notre arrondissement présente plusieurs applications de ce système sur petite échelle. Tel est (*fig.* 3, 4, 5) un porteur établi à Arrigas pour le transport de pierres à plâtre d'un bord à l'autre d'une profonde vallée de 223 mètres de largeur, avec une descente de $32^{m},70$ seulement. La benne chargée pèse 280 kilogrammes. L'installation, d'une extrême simplicité, n'a coûté que 1.500 francs ; elle permet cependant d'effectuer des transports qui eussent été pour ainsi dire irréalisables par les moyens ordinaires.

4° *Système Gourjon.* — M. Gourjon n'emploie qu'un câble sans fin, à la fois porteur et tracteur, en un mot transporteur, mobile sur deux poulies placées dans un même plan vertical, et portant suspendues à des intervalles égaux, sur le brin inférieur les bennes chargées

pour l'aller, sur le brin supérieur les bennes vides pour le retour. Le mouvement, donné comme toujours, suivant les cas, par la pesanteur ou par un moteur spécial, est continu, par suite régulier, et la tension du câble reste d'elle-même constante comme sa forme. Enfin, l'installation est aussi simple, partant aussi économique qu'on peut le souhaiter.

5° *Exemples. Câble du Teil.* — Au Teil (*fig.* 6, 7), la distance horizontale est de 474^{m},86; elle rachète une différence de niveau de 24^{m},90 seulement, ce qui oblige à emprunter au moteur de l'usine le peu de force nécessaire pour compléter l'action de la pesanteur. Les bennes sont de simples corbeilles en tôle suspendues au câble par deux tiges, entre deux bagues qui les empêchent de glisser et leur permettent seulement d'osciller transversalement. Un guide-glissière en fer, convenablement disposé le long et près de la jante de la poulie d'arrivée, incline d'abord les tiges de façon à vider les corbeilles automatiquement, et les soutient ensuite horizontalement, de façon à maintenir les corbeilles en dehors du plan de la poulie, pendant que le câble leur en fait faire le tour. Une fois les corbeilles passées vides sur le brin supérieur, le guide abandonne leurs tiges, et, reprenant leur position verticale, elles sont ramenées à la carrière où un guide-glissière semblable les soutient encore en dehors du plan de la poulie pendant leur passage autour d'elle. Les corbeilles chargées pèsent 50 kilogrammes et sont espacées de 34 mètres. La vitesse de marche est de 1^{m},75 ; le trafic, de 70 tonnes ; la dépense d'installation, de 2.500 francs ; et le prix de revient du transport, de 0^{f},20.

6° *Câble de Saint-Imier.* — M. Gourjon a établi à Saint-Imier, près de Grenoble, encore pour le transport

de pierres à ciment, un câble fonctionnant dans les mêmes conditions, mais sur une longueur beaucoup plus grande, soit 2.500 mètres. Le câble suit une vallée dont il épouse les sinuosités. Ses deux brins, dans l'intervalle des poulies extrêmes, sont soutenus au même niveau par des poulies fixées à des potences espacées de 150 mètres environ. Pour ne pas toucher les poulies, les tiges de suspension sont en forme de col de cygne. Le câble, de 17 millimètres de diamètre, en acier, a été fabriqué en Angleterre, suivant un système nouveau dit « excelsior » (*fig.* 8). La section des fils figure un épais croissant qui porterait à l'une de ses pointes un bourrelet aplati latéralement. La surface extérieure est absolument lisse et il n'y a plus pour ainsi dire aucun vide à l'intérieur (*). Deux couronnes consécutives sont enroulées en sens opposés. L'installation, qui est revenue à 13,000 francs, suffit à un trafic journalier de 50 tonnes, au prix de $0^{f},24$ la tonne kilométrique.

7° *Câble d'Alzon.* — Ce câble (*fig.* 9, 10), situé dans notre arrondissement, a été posé pour transporter, d'un bord à l'autre d'une vallée de $481^{m},30$ de largeur, les moellons destinés aux maçonneries d'une entreprise de chemin de fer. C'est cet emploi d'un grand porteur aérien dans l'exécution d'un travail public qui a attiré notre attention et motivé cette note. A Alzon, on a profité de l'excès de puissance de la pesanteur résultant d'une différence de niveau de $144^{m},62$, pour mettre en mouvement, en l'attelant à la poulie de départ, un second câble plus court, de $224^{m},86$ de portée et $14^{m},68$ de montée, élevant et amenant les matériaux de la carrière même à la poulie du bord de la vallée, transformée ainsi en poulie double intermédiaire.

(*) Un câble en fils ronds de même poids et d'un même nombre de fils aurait un diamètre de 23 millimètres, soit 1/3 en plus.

Les bennes devant passer d'un câble sur l'autre ne pouvaient plus ici leur rester fixées, et la recherche d'un mode convenable d'accrochage n'a pas laissé que de présenter quelque difficulté à cause de l'inclinaison du câble qui atteint 27°. Les bennes sont de simples plateaux à claire-voie suspendus par quatre chaînes à l'une des branches d'un crochet en forme de compas, qui embrasse le câble et le serre suffisamment pour ne pas glisser. La branche mobile est maintenue serrée contre la branche fixe par un levier coudé horizontal articulé sur celle-ci et formant déclic. Ce déclic permet le décrochage automatique des bennes par le simple choc de l'extrémité du levier contre un obstacle fixe. Mais l'accrochage exige l'arrêt des câbles, inconvénient grave dans un système dont la continuité de mouvement fait le principal mérite. Pendant cet arrêt, de très courte durée d'ailleurs, on accroche deux bennes chargées sur les brins inférieurs, l'une en carrière, l'autre à la station centrale, et deux bennes vides sur les brins supérieurs, l'une à la station d'arrivée, l'autre à la station centrale. Bien qu'il résulte de cet arrêt une réduction de trafic de près de moitié, le système fonctionne encore très utilement, puisqu'il permet de transporter journellement 130 tonnes au prix de 1f,50 la tonne, au lieu de 3 francs, prix du transport par voiture, d'où aurait pu résulter, pour un cube à transporter de 40.000 mètres cubes, une économie de 60.000 francs, s'il n'y avait pas eu quelques mécomptes au début.

Faute en effet d'avoir calculé les tensions des câbles, plusieurs accidents sont survenus : rupture des treuils de tension pendant la pose, déplacement des bâtis trop peu solidement amarrés, usure de leurs jantes résultant de l'obliquité des poulies ainsi déplacées, ruptures répétées du petit câble, d'abord de qualité inférieure à celle du grand. Il a suffi de changer le petit câble et de pro-

céder à un nouveau montage plus soigné pour que le système fonctionnât parfaitement. Faute également de s'être rendu compte des flèches que devaient prendre les brins inférieurs, il a fallu creuser aux abords de la poulie centrale, trop peu élevée au-dessus du sol, de profondes tranchées que l'on aurait pu très facilement éviter. L'installation ne serait alors revenue qu'à 12.000 fr.

8° *Système Brenier et Cᵉ.* — La maison Brenier et Cᵉ, de Grenoble, qui a installé pour MM. Vicat et Cᵉ le câble porteur de la Porte-de-France et qui s'est fait une véritable spécialité de ce genre d'installation, installe en ce moment pour la même compagnie un câble transporteur sans fin (*fig.* 11 à 14, Pl. 47), dont le fonctionnement est analogue à celui du système Gourjon, mais dont les brins, marchant de niveau, sont reçus aux stations sur des poulies-croupières verticales qui les renvoient, sous une inclinaison de 20 à 25° environ, à la poulie d'enroulement placée de plat, un peu *plus bas*. Cette modification est très importante, en ce qu'elle facilite beaucoup le décrochage et l'accrochage des bennes, sans arrêt du câble, quelle que soit leur charge.

A cet effet, un rail horizontal, disposé au niveau des brins à leur passage sur les poulies croupières, décrit une courbe en forme de fer-à-cheval autour des poulies d'enroulement et se termine par deux aiguilles de bifurcation tout près des poulies croupières. La suspension brevetée se compose d'un sabot de friction à gorge et d'une poulie de roulement accolés, celle-ci du côté extérieur, et d'une tige de suspension en col de cygne. Le câble engagé, comme un coin, dans la gorge biseautée du sabot, entraîne la benne sans glissement. A l'arrivée, la benne tendant à *descendre* avec le câble, après le passage des poulies-croupières, sa poulie de roulement vient porter sur l'aiguille de bifurcation qui maintient la

benne à sa hauteur d'arrivée, tandis que le câble, continuant à descendre, se dégage du sabot. La benne roule ensuite sur le rail qui l'éloigne du câble. Au départ, la benne passe du rail sur le câble qui *monte*, par un mouvement inverse. Les poulies-supports, croupières ou intermédiaires, s'il y en a, ont une gorge assez évasée pour permettre le passage des sabots. En réalité, chaque benne est suspendue par une paire de sabots, placés l'un devant l'autre, afin qu'il y en ait toujours un en prise sur le câble quand l'autre, un peu soulevé au passage de la poulie-support, s'en dégage momentanément.

L'installation projetée de 675 mètres de longueur et 74 mètres de descente coûtera 11.000 francs. Elle permettra, à faible vitesse, la descente journalière de 72 tonnes de ciment des fours à l'usine, au prix de $0^f,22$ au lieu de $1^f,10$, prix actuel du transport par voiture. La dépense d'installation sera amortie en moins d'une année. On pourra d'ailleurs porter aisément le trafic à 100 tonnes par une légère augmentation de vitesse, et aussi utiliser les bennes vides pour la montée du charbon aux fours. Dans cette prévision, la poulie d'arrivée, rendue motrice par l'effet de la pesanteur, sera liée au moteur de l'usine pour lui emprunter ou lui remettre de la force suivant les cas et pour y trouver toujours un régulateur de vitesse. Un chariot tenseur assure la régularité des tensions contre les variations de la température.

La maison Brenier a installé un câble du même genre aux mines d'anthracite de Pierre-Châtel (*fig.* 15). Sur un terrain à pente régulière de $0^m,20$, un câble de 18 millimètres, soutenu tous les 36 mètres, donne à la vitesse de 1 mètre, avec des bennes pesant 240 kilogrammes et espacées de 54 mètres, un trafic de 100 tonnes. C'est un plan incliné réduit à son câble tracteur, avec réduction de grosseur de ce câble unique par l'effet de la continuité

du mouvement, et avec suppression des chances d'accident provenant de rupture et de dérive.

9° *Système Obach.* — Pour compléter cet aperçu, nous résumerons l'intéressante description, donnée dans les *Annales des Mines* de 1886, d'une application véritablement grandiose, faite aux hauts fourneaux de Vajdna-Hyniad, en Transylvanie, d'un système de transport par câbles qui participe à la fois des deux systèmes précédents.

Le minerai se trouve à 9.600 mètres de l'usine, le charbon, encore 21.400 mètres plus loin. Les accidents de terrain rendant très difficile l'établissement soit d'une route, soit d'une voie ferrée ordinaire, on y a suppléé par une véritable voie ferrée aérienne, de 31 kilomètres de longueur, dont l'établissement rappelle le système de la Porte-de-France, et l'exploitation, celui du Teil.

En effet, les deux câbles porteurs sont fixes au même niveau; mais un grand nombre de bennes y sont suspendues, et, se suivant à intervalles égaux, s'en vont par un câble et reviennent par l'autre, entraînées toujours dans le même sens par un câble moteur sans fin et à mouvement continu auquel on les accroche.

La longueur totale a été divisée en 8 sections rectilignes de 4.000 mètres de longueur environ, indépendantes, c'est-à-dire ayant chacune ses câbles porteurs et moteurs, et reliées par sept gares d'échange. Ces câbles sont soutenus, les premiers par des poulies, les seconds par des rouleaux, fixés à des potences en charpente espacées de 100 mètres, exceptionnellement 200 mètres et même 470 mètres (*fig.* 16). Il importait beaucoup ici d'assurer la constance des tensions. A cet effet, aux deux extrémités de chaque section, les câbles porteurs sont tendus par des contrepoids, et le câble moteur s'enroule, d'un côté sur une poulie horizontale portée par un va-

gonnet tenseur, de l'autre sur une poulie horizontale mise en mouvement par une machine à vapeur.

La tige de suspension des bennes évite les poulies-supports par sa forme en col de cygne, et les rouleaux-supports sont placés assez bas pour ne pas être touchés par les bennes. La continuité de la voie est assurée, au droit des poulies-supports (*fig.* 17), comme au passage d'une section à une autre, par des rails à aiguille dont la disposition est facile à concevoir; la continuité de la marche des bennes, dans leur passage d'un câble moteur sur le suivant, est assurée par un système de décrochage automatique et une légère inclinaison du rail intermédiaire.

Le décrochage et l'accrochage des bennes (*fig.* 18) se font au moyen d'une clef placée sur leur tige de suspension. Cette clef, suivant sa position, serre, mais sous la réserve d'un petit jeu, réglé seulement par un ressort, ou desserre les deux moitiés d'un manchon (*fig.* 19), dans lequel passe le câble moteur. Ce manchon a la forme d'une mâchoire à deux dents : fermé, il présente, de part et d'autre d'un vide intérieur cylindrique, deux vides tronconiques plus petits, s'évasant vers l'extérieur, et dont les diamètres extrêmes sont l'un plus grand, l'autre plus petit que celui de bagues en acier dont le câble est muni de 10 en 10 mètres, le plus petit restant supérieur au diamètre du câble.

A l'arrivée d'une benne, un guide-glissière incline le levier de la clef de manière à ouvrir la mâchoire; le câble moteur, à ce moment un peu relevé, retombe et se dégage. Un ouvrier pousse la benne sur le rail en pente intermédiaire et de là sur le câble porteur suivant. Ce mouvement replace les deux parties, maintenant écartées de la mâchoire, au niveau et de part et d'autre du câble moteur de la section suivante. En même temps, l'ouvrier en tournant le levier de la clef, resserre la mâchoire qui se referme sur le câble. Celui-ci glisse d'abord dans le

manchon sans l'entraîner; mais la première bague qui se présente s'engage dans la partie tronconique, en écarte facilement les deux parties, grâce au jeu commandé par la seule élasticité du ressort, et pénètre ainsi dans le vide central, d'où elle ne peut plus sortir; le câble entraîne donc le manchon et avec lui la benne jusqu'à la gare suivante où les mêmes faits se reproduisent.

L'inclinaison de cette voie aérienne étant trop faible pour que le mouvement soit automatique, les gares contiennent, de deux en deux, un moteur à vapeur de 9 chevaux environ, actionnant la poulie, unique, mais à double gorge, sur laquelle s'enroulent les câbles moteurs des deux sections contiguës. Des compteurs de tours permettent de donner exactement la même vitesse de marche à toutes les poulies motrices de cette machine de 31 kilomètres de longueur.

La dépense de premier établissement a été de 38.000 fr. par kilomètre. Le transport d'une tonne kilométrique revient à 0f,90. Il eût été sensiblement plus coûteux par les moyens ordinaires de transport.

10° *Résumé*. — Les descriptions qui précèdent sont résumées sur le tableau suivant, qui contient aussi quelques indications complémentaires.

TABLEAU A.

	PLANS INCLINÉS (mouvement alternatif)		SYSTÈME mixte Obach	CABLES PORTEURS SANS FIN (MOUVEMENT CONTINU)				
				sur poulies verticales (système Gourjon)			sur poulies horizontales (système Brenier)	
	Porte de France	Arrigas	Vajda-Hymad	Le Teil	Saint-Imier	Alzon (Grand câble / Petit câble)	Vicat	Chatel
Portée totale	475ᵐ	223	31.000	474,86	2.500	706,16	675	640
Nombre de portées partielles	1	1	environ 300	1	17	2	2	18
Descente	350ᵐ	32,7	797	24,90	250	129,94	74	130
Pente par mètre	0ᵐ,73	0,15	0,025 (4)	0,05 (4)	0,10	0,18	0,11	0,20
Flèche verticale	34ᵐ,5	5,05	»	23,85	»	24,4 — 9,7	»	»
Rapport de la flèche normale à la corde — Brin porteur ou inférieur	$\frac{1}{21}$	$\frac{1}{44}$	»	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{12}$ à $\frac{1}{20}$	$\frac{1}{21}$ — $\frac{1}{23}$	$\frac{1}{20}$	»
Rapport de la flèche normale à la corde — Brin supérieur	»	»	»	$\frac{1}{40}$	»	$\frac{1}{50}$ — $\frac{1}{42}$	»	»
Câble principal (1) — Diamètre	45ᵐᵐ	16	26	14	17	25	21,6	18
Câble principal (1) — Poids du mètre	5ᵏ,5	0,85	2,4	0,7	1,48 (5)	2,26	»	»
Câble tracteur — Diamètre	18ᵐᵐ	6,2	18	»	»	»	»	»
Câble tracteur — Poids du mètre	1ᵏ,16	0,175	1,07	»	»	»	»	»
Diamètre de la poulie d'enroulement	3ᵐ (3)	1,00	2,00	2,00	2.00	2.10	1.6	1,6
Rapport au diamètre du câble	166	161	111	143	118	84	74	89
Bennes — Espacement	»	»	54	34	43	38	40	54
Bennes — Poids mort, a	300ᵏ	80	200	12	12	20	50	90
Bennes — Poids utile, b	900ᵏ	200	300	38	38	160	80	150
Bennes — Rapport, $\frac{a}{a+b}$	0,25	0,29	0,40	0,24	0,24	0,11	0,38	0,37
Inclinaison maxima du câble	45°,47′	20°,30′	»	»	»	27°	15°	»
Mode de suspension	poulie	poulie	poulie-bague	à demeure	à demeure	pince	sabot	sabot
Vitesse de marche	6ᵐ,0	7,5	1,2	1,75	1,0	1,0	1,0	1,0
Trafic journalier courant	100ᵗ	9	300	70	50	130	72	100
Dépense d'établissement (2)	25 000 fr.	1.500	1.176.000	2.500	13.000	12.000	11.000	»
Durée probable des câbles — fixes	15 ans	10	»	»	»	»	»	»
Durée probable des câbles — mobiles	2 ans	»	1	6	»	»	3	»
Prix de revient du transport — d'une tonne	0ᶠ,26	»	»	0,20	0,24	1,50	0,22	»
Prix de revient du transport — d'une tonne kilométrique	»	»	0,90	»	0,60	»	»	»

(1) Tous ces câbles sont en acier, à l'exception du câble porteur de la Porte de France.
(2) Non compris les indemnités de terrains.
(3) Le câble fait deux tours sur cette poulie dont la gorge est très évasée.
(4) Avec ces faibles pentes, une force motrice additionnelle est nécessaire.
(5) Ce câble, du genre excelsior, est relativement plus lourd que les autres.

11° *Calculs.* — Il est essentiel, on l'a vu, pour éviter des mécomptes, de se rendre *a priori* un compte exact des flèches qu'il convient de donner aux câbles, et des efforts qui en résultent. Cette recherche est encore utile pour comparer les deux principaux systèmes en présence.

12° *Flèches.* — La flèche, ou l'inclinaison du câble à son extrémité, est une des données du problème. La flèche est une donnée plus commode que l'angle. L'expérience indique qu'il convient de ne pas la prendre inférieure à 1/20 de la corde. Le calcul va démontrer qu'il est avantageux de la prendre plus grande, si on le peut, pour réduire les tensions et les résistances passives.

13° *Tensions. Système Gourjon.* — Soient, *fig.* 20 :

$2l, 2h, 2c$ les portées horizontale, verticale et la corde du brin considéré;

f la flèche *verticale* mesurée dans l'état ordinaire du câble, c'est-à-dire à charge dans le système Gourjon, sans charge dans celui de la Porte-de-France;

ω, p, ρ la section en millimètres carrés, le poids et le travail des fils utiles, c'est-à-dire enroulés (*). A 1 mètre de câble correspond 1m,10 de fil; par suite, on a

$$p = \omega \times 1,10 \times 0,0078 = 0^k,0085 \times \omega;$$

$\omega_0, p_0, \rho_0, \omega_1, p_1, \rho_1$, les mêmes éléments pour les câbles porteur et tracteur du système de la Porte-de-France;

2π la charge totale suspendue au brin;

$2P$ le poids total, brin et charge : $2P = 2pc + 2\pi$ (**);

(*) Nous négligeons les fils axiaux (souvent en chanvre) des torons et du câble. Ils ne doivent pas entrer dans le calcul de la section utile au point de vue de la résistance; et leur poids peut être négligé sans inconvénient.

(**) Nous supposons que la longueur du brin ne diffère pas de celle de sa corde, cette différence ne dépassant pas 1/100. En effet, la première longueur diffère très peu de celle d'un arc de parabole ayant même corde et même flèche normale f_1, savoir $2s = 2c\left(1 + \frac{1}{6}\frac{4f_1^2}{c^2}\right)$. La différence proportionnelle est donc $\frac{2}{3}\frac{f_1^2}{c^2}$, soit 0,01 pour $\frac{f_1}{c} = \frac{1}{8}$, valeur qui ne sera presque jamais dépassée.

m l'hypoténuse d'un triangle rectangle de côtés l et $h+2f$;
α_m, t_m l'inclinaison et la tension du brin au point M;
A, α, T, t ces mêmes éléments aux points extrêmes, haut et bas;
Q la poussée ou tension horizontale, constante.

Le mouvement étant uniforme et la forme du câble étant fixe, les tensions aux divers points restent constantes et satisfont aux conditions de l'équilibre statique.

On a donc, en projetant les forces sur l'horizontale, et en considérant successivement la totalité, ou une fraction quelconque de l'arc :

$$\mathrm{T}\cos\mathrm{A} = t\cos\alpha = t_m\cos\alpha_m = \mathrm{Q}, \qquad (0)$$

et, en les projetant sur la verticale pour l'arc entier :

$$\mathrm{T}\sin\mathrm{A} = t\sin\alpha + 2\mathrm{P}.$$

Nous aurions dû, en toute rigueur, introduire dans le calcul la force centrifuge $\frac{mv^2}{\mathrm{R}}$, qui augmente la tension du câble comme le ferait une légère augmentation du poids des bennes. Mais cette force est absolument négligeable, la vitesse étant toujours très faible et le rayon toujours très grand (*).

On tire de ces équations les valeurs de la poussée et des tensions :

$$\left.\begin{aligned} t_m &= \frac{\mathrm{Q}}{\cos\alpha_m}, \\ \mathrm{Q}\,\mathrm{tg}\,\mathrm{A} &= \mathrm{Q}\,\mathrm{tg}\,\alpha + 2\mathrm{P}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

La forme de l'arc intervient dans la détermination des tangentes. L'équation de la chaînette, qui est la forme vraie de l'arc, étant d'un usage difficile, nous admettons, pour conserver à un problème de pratique la forme élé-

(*) Cette force serait, par exemple, pour le grand câble d'Alzon, de 7 kilogrammes seulement.

mentaire qui lui convient, que l'arc affecte une forme parabolique, ce qui revient à supposer, comme l'on sait, que le poids du brin par mètre courant de projection horizontale est constant. Cette hypothèse est assez voisine de la vérité (*) ; en tous cas elle est sans aucun danger, parce qu'elle conduit, pour le point haut, à des inclinaisons trop faibles, comparées à celles de la chaînette, par suite à des tensions trop fortes.

On a, dès lors, d'après les propriétés des tangentes à la parabole :

$$\operatorname{tg} A = \frac{h+2f}{l}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{h-2f}{l}, \quad \operatorname{tg} \alpha_v = \frac{h}{l};$$

directions représentées par les sécantes m, m', c, et les équations 1 donnent finalement :

$$\left.\begin{aligned} Q &= \frac{P}{2f}\, l, \\ t_m = \frac{Q}{\cos \alpha_m} &= \frac{P}{2f}\, m_m, \\ \text{en particulier :} & \\ T = \frac{P}{2f}\sqrt{l^2+(h+2f)^2} &= \frac{P}{2f}\, m, \\ t = \frac{P}{2f}\sqrt{l^2+(h-2f)^2} &= \frac{P}{2f}\, m', \\ t_v = \frac{P}{2f}\sqrt{l^2+h^2} &= \frac{P}{2f}\, c. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Ainsi, la tension diminue du point le plus haut au point le plus bas, qu'il soit ou non à un extrémité,

(*) Ce poids varie comme la sécante de l'inclinaison ; le rapport de ses valeurs extrêmes est donc $\frac{\text{séc}\,A}{\text{séc}\,\alpha} = \sqrt{\frac{l^2+(h+2f)^2}{l^2+(h-2f)^2}}$ (en supposant que le point le plus bas du câble soit à son extrémité inférieure, sans quoi il faudrait remplacer le dénominateur par l'unité). La différence relative a pour valeur, f restant égal $\frac{l}{10}$, 8,6 et 14,5 p. 100, suivant que $h = \frac{l}{4}$ ou atteint $\frac{l}{2}$, valeur qu'il ne dépassera que très rarement.

comme diminue la sécante m, parallèle à la tangente. Elle est égale au produit de cette sécante par le facteur constant $\frac{\text{demi-poids}}{\text{double-flèche}}$, ce qui permet d'en mesurer immédiatement sur la figure les valeurs principales, T qui est toujours la plus grande et qui seule intéresse, et, si l'on veut, t, t_p.

14° *Conditions d'équilibre. Résistances passives.* — Considérons maintenant l'ensemble des deux brins, en distinguant par un indice, parmi les éléments variables d'un brin à l'autre, ceux relatifs au brin supérieur.

Pour que les deux brins se maintinssent en équilibre statique, il faudrait que l'on ait : $T = T_1$ et $t = t_1$. Effectuant les calculs, posant $K = \frac{f}{f_1}$, et écartant la solution $K = 1$, on trouve :

$$K \quad \text{ou} \quad \frac{f}{f_1} = \frac{C^2}{4f_1^2} = \frac{P^2}{P_1^2},$$

et on aurait alors :

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{P_1}{P}.$$

Ces conditions conduisent à des valeurs inadmissibles pour les flèches ou pour les poids. Le câble se mettra donc en mouvement, ce qui suppose une différence entre les tensions des deux brins se joignant sur une même poulie.

Pour que ce mouvement soit uniforme, c'est-à-dire pour qu'il y ait, comme il convient, équilibre dynamique, il faut que, à chaque poulie, la tension du brin conducteur dépasse celle du brin conduit de la valeur, mesurée comme elle à l'extrémité du rayon, des résistances passives provenant : 1° du frottement des tourillons ; 2° de la raideur du câble.

La résistance due au frottement a pour formule pratique $2\varphi \frac{d}{D} T$ (*), en désignant par φ le coefficient du frottement, par D et d les diamètres de la poulie et de ses tourillons, et par T la tension du brin conduit.

La résistance due à la raideur du câble est de la forme $\frac{1}{D}(a + bT)$, comme celle due à la raideur des cordes, a et b étant des coefficients constants pour un même câble. Mais ces coefficients n'ont pas été jusqu'ici, que nous sachions, déterminés pour les câbles métalliques comme ils l'ont été pour les cordes, malgré tout l'intérêt qui s'attacherait à cette détermination aujourd'hui que l'usage des câbles est très répandu. M. Murgue, ingénieur de la Compagnie houillère de Bessèges, a bien voulu, sur notre demande, procéder à la mesure de ces coefficients pour quelques câbles analogues à ceux dont nous nous occupons. Ses recherches, très ingénieuses et très précises, sont consignées, avec leurs résultats, dans une note spéciale faisant suite à celle-ci.

Les résistances passives, ou différence de tension des deux brins à une même poulie, ont donc pour expression :

$$\frac{1}{D}(2\varphi d T + a + bT) \text{ (**)}. \qquad (3)$$

(*) La formule théorique est $\frac{\varphi}{\sqrt{1-\varphi^2}} \frac{d}{D} R$, R étant la résultante des tensions des deux brins. Mais le terme $\frac{\varphi}{\sqrt{1-\varphi^2}}$ diffère très peu de φ; ainsi il est égal à 0,07975 pour $\varphi = 0,08$; et R, résultante de deux tensions presque parallèles et ne différant pas entre elles de plus de 2 p. 100, diffère encore moins du double de la plus petite d'entre elles T.

(**) A la condition, bien entendu, que la poulie soit libre. Il n'en est pas ainsi, par exemple, au Teil, pour la poulie d'arrivée, entraînée par un moteur spécial, et à Alzon, pour la poulie centrale, entraînant un deuxième câble. Cette différence est naturellement moins élevée dans le premier cas, plus élevée dans le second.

Comme le cas imaginaire de l'équilibre statique, celui de l'équilibre dynamique conduit à des relations simples, mais seulement approximatives, entre les principaux éléments du problème, savoir :

$$\frac{f}{f_1}=\frac{P}{P_1}, \quad Q=Q_1, \quad t_r=t_{1r}. \qquad (4)$$

Ces relations, approchées à 3 ou 4 p. 100 près, permettent de se fixer *a priori* les idées sur les valeurs relatives des flèches et des tensions des deux brins. L'égalité des poussées, dont les deux autres relations ne sont que la conséquence, résulte de ce que ces poussées sont les projections horizontales de tensions, qui, prises près d'une poulie, sur chacun des deux brins, diffèrent entre elles de moins de 2 p. 100, comme nous le verrons plus loin, et sont presque parallèles, la plus grande étant d'ailleurs toujours précisément la plus inclinée.

15° *Epissure.*— Il est essentiel d'observer que la résistance d'un câble sans fin est réduite dans une forte proportion par le fait seul de l'épissure. M. Stein, fabricant de câbles à Danjoutin-Belfort, estime cette perte de résistance de 5 à 10 p. 100 quand l'épissure est bien faite. M. Arnodin, constructeur de ponts suspendus à Châteauneuf-sur-Loire, l'estime à 20 p. 100 au minimum. Nous pensons que cette dernière évaluation est la plus exacte, puisque, pour faire une épissure, on coupe successivement et à des distances rapprochées un toron sur les six dont se compose généralement le câble.

16° *Exemples.* — Appliquées aux installations du Teil et d'Alzon, les formules (2) donnent pour tensions maxima, dans le premier cas, 2.700 kilogrammes, dans le second, 9.900 kilogrammes pour le grand câble (*) et

(*) On trouve, en réalité, $T = 9.580$, $t = 8.600$, $T_1 = 9.520$, $t_1 = 9.110$. Les différences de tensions qui en résultent sur chaque poulie n'étant pas bien

4.100 pour le petit. Ces tensions paraissent trop élevées pour les câbles employés. Il en résulte en effet qu'au Teil, le câble, en acier ordinaire, supportant un effort de 30 kilogrammes par millimètre carré, travaille à $\frac{1}{2,5}$ de sa résistance, réduite de 90 à 72 kilogrammes par l'épissure, et que, à Alzon, le grand câble, en acier anglais supérieur, supportant 47 kilogrammes, travaille à $\frac{1}{2}$ de sa résistance, réduite de même de 120 à 96 kilogrammes.

Les résistances passives sont également importantes à considérer. Au Teil, où la déclivité du câble est seulement de 0,05, elles annulent et au delà la puissance de la pesanteur. A Alzon, malgré une déclivité de 0,18, le système étant, il est vrai, composé de deux câbles et de trois poulies, la pesanteur, suffisante pour maintenir le système en mouvement, ne l'est plus pour le remettre rapidement en marche après chaque arrêt. Il est facile de s'en rendre compte par l'application de la formule (3) dans laquelle on peut faire $D = 2$, $d = 0,10$, $\varphi = 0,10$, et, d'après les expériences de M. Murgue, $a = 6$ et $b = 0,007$, approximativement. On trouve alors pour la résistance passive des quatre enroulements qui ont lieu sous une tension moyenne de 6.550 kilogrammes :

$$4 \times \frac{1}{2} (2 \times 0.1 \times 0.1 \times 6550 \times 6 \times 0.007 \times 6550) = 364^{k}.$$

proportionnées, nous avons corrigé les données, qui, en pareille matière, manquent toujours d'exactitude et surtout de concordance, de manière à satisfaire à la relation (4). Il a suffi pour cela, soit d'augmenter de 1/9 la charge utile des bennes, soit de diminuer f de 1/50 et d'augmenter f_1 de 1/100. On trouve alors des valeurs (entre autres celle indiquée) donnant, à chaque poulie, des différences convenables, égales à 2,2 p. 100, des tensions des brins conduits, avec un excédent de 109 kilogrammes sur la poulie centrale, excédant nécessaire pour assurer la marche du système et compenser le frottement du frein actionnant cette poulie.

soit exactement 1,4 p. 100 de la tension de chaque brin conduit (*). C'est une fraction importante de l'action de la pesanteur qui est, pour l'ensemble du système, et pour un mètre d'enroulement, soit $\frac{130}{\sqrt{130^2 \times 706^2}} = 0{,}181$ de chute, les bennes suspendues étant au nombre de 19, et les brins étant supposés se faire équilibre, comme les bennes vides :

$$19 \times 160 \times 0{,}181 = 550^{k}.$$

Le travail moteur excédent, ou tension motrice disponible sur la poulie est donc réduit à 186 kilogrammes; puissance un peu faible pour remettre rapidement en marche un système pesant près de 8.000 kilogrammes. Ce calcul explique l'obligation où l'on s'est trouvé d'accoler à la poulie centrale un treuil spécial de mise en marche. Grâce à ce treuil, la remise en marche est très facile, et il en est de même de l'arrêt périodique, opéré à l'aide du frein, à des intervalles de 40″ seulement, l'accélération n'ayant pu, en si peu de temps, imprimer à tout le système une vitesse exagérée.

La relation approximative (4) se vérifie également dans les deux exemples :

(*) Cette différence de 1,4 p. 100 par poulie, soit 2,8 pour les deux, peut être rapprochée de la perte de tension des câbles télodynamiques, évaluée à moins de 3 p. 100 par Ferdinand Hirn, leur inventeur si désintéressé (*Annales*, Chronique, 1859). Le successeur de Hirn nous a confirmé ce résultat à la suite de mesures toutes récentes. Il ajoute, ce qui n'est pas sans intérêt, que le fonctionnement de ces câbles ne laisse rien à désirer à la condition qu'ils soient bien établis, c'est-à-dire très minces, en fils aussi fins que possible, montés sur des poulies très légères, très bien faites, et marchant à la vitesse de 30 mètres environ. Les câbles qu'il emploie pour transporter jusqu'à 200 mètres des forces dépassant 100 chevaux, n'ont que 12 millimètres de diamètre, et se composent de 60 fils en 6 torons.

Les flèches de ces câbles, très variables avec la température, sont en moyenne de 1/40 pour le brin conducteur et 1/20 pour le brin conduit. Nous avons trouvé les mêmes proportions au Teil et à Alzon.

au Teil, $\frac{f}{f_1} = 2$ et $\frac{P}{P_1} = 2{,}06$;

à Alzon, $\frac{f}{f_1} = 2{,}50$ et $\frac{P}{P_1} = 2{,}51$.

17° *Système de la Porte-de-France. Câble porteur.* — La charge mobile comprend ici, outre le poids de la benne chargée, que nous continuerons à représenter par 2π, la moitié, $p_1 c$, du poids du câble tracteur qui lui est suspendu. On a donc :

$$2P = 2p_0 c + 2\pi + 2p_1 c.$$

Pendant la descente de la benne, la courbe du câble se déforme; ses inclinaisons supérieure et inférieure diminuent toutes les deux, mais celle-ci plus que celle-là. A la Porte-de-France, par exemple, l'angle A diminue de 45°47′ à 45°, soit de 47′, l'angle α diminue de 23°31′ à 21°21, soit de 2°10′. A Arrigas, ces diminutions sont de 20°30′ à 12°25′, soit 8°5′, et de + 3°20′ à — 11°20′ soit de 14°40′.

1. La notice relative aux tréfileries et câbleries de la Compagnie des forges de Châtillon-Commentry contient, pour les câbles dont il s'agit, des calculs tout faits, basés sur les formules suivantes :

$$\left.\begin{aligned} \omega_1 &= 2\pi \frac{1}{\rho_1 \sin A - 2s\delta}, \\ \omega_0 &= 2\pi \frac{\rho_1 \sin A}{\rho_1 \sin A - 2s\delta} \frac{1}{\rho_0 \sin A - 2s\delta}, \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

dans lesquelles

$$\sin A = \frac{2h}{\sqrt{l^2 + 4h^2}}, \quad 2s = 2l\left[1 + \frac{1}{6}\left(\frac{2h}{l}\right)^2\right] \quad \text{et} \quad \delta = 0{,}0085.$$

Ces formules expriment simplement l'équilibre des forces projetées sur une verticale, dans l'hypothèse que les câbles affectent la forme parabolique et sont horizontaux à leur extrémité inférieure, que le câble porteur

supporte le poids entier du câble tracteur, et que le câble tracteur supporte le poids entier de la benne. Ces hypothèses sont absolument gratuites, celle surtout de l'horizontalité du câble à son point bas, et les formules qui en résultent ne sauraient avoir aucune généralité. La deuxième formule paraît même dangereuse en ce qu'elle conduit à des sections beaucoup trop faibles pour les câbles porteurs.

Appliquées aux deux exemples précités, elles donnent pour le même travail unitaire, que nous calculerons plus loin, des sections très différentes de celles adoptées, savoir : 95 et 94 millimètres carrés, au lieu de 647 et 136 dans le premier cas, 46 et 43 au lieu de 100, et 20 dans le second.

2. Cette même notice indique comme plus exactes les formules suivantes qui donnent, à un moment quelconque de la course de la benne, les tensions inférieure et supérieure du câble porteur en fonction de l'inclinaison inférieure α, et de l'abscisse a, de la benne mobile M (*fig.* 20).

$$\left.\begin{aligned} t &= \frac{(p_0+p_1)cl+\pi(2l-a)}{h\cos\alpha - l\sin\alpha}, \\ T^2 &= t^2+[2\pi+(p_0+p_1)2c][2\pi+(p_0+p_1)2c+2t\sin\alpha]. \end{aligned}\right\} (6)$$

Les formules exactes sont en effet peu différentes et les voici :

$$\left.\begin{aligned} t &= \frac{p_0cl+\left(\pi+\frac{1}{2}p_1c\right)(2l-a)}{h\cos\alpha - l\sin\alpha}, \\ T^2 &= t^2+2P(2P+2t\sin\alpha). \end{aligned}\right\} (7)$$

Nous en donnerons plus loin la démonstration.

Mais en premier lieu, ces formules ne sont pas d'une application immédiate, puisqu'il reste à définir l'inclinaison donnant la tension maximum. En second lieu, l'inclinaison du câble nous paraît une donnée moins commode que sa flèche à l'état libre f.

En général on suppose α constant, et alors le maximum de t et le maximum correspondant de T ont lieu par $a=o$, et ont pour expression :

$$\left.\begin{aligned} t &= \frac{(p_0c + p_1c + 2\pi)l}{h\cos\alpha_0 - l\sin\alpha_0}, \\ T^2 &= t^2 + 2P(2P + 2t\sin\alpha_0). \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

On prend d'ailleurs comme donnée la plus petite valeur de α, soit α_0, qui est en effet celle qui correspond à l'abscisse $a=0$.

On a bien ainsi la plus grande valeur de t, mais on n'a que la valeur correspondante de T et non pas son maximum absolu.

3. Pour avoir cette dernière valeur, il faut chercher directement T en fonction de l'inclinaison supérieure A.

Quelle que soit la forme du câble, l'égalité des forces en projections donne :

$$\left.\begin{aligned} T\cos A &= t\cos\alpha, \\ T\sin A &= t\sin\alpha + 2P. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

et l'égalité des moments, pris par rapport à l'extrémité inférieure, donne

$$\begin{aligned} 2p_0cl + (2\pi + p_1c)a &= T(A'B' \text{ ou } \overline{A'D' - BD}) \\ &= T(2l\sin A - 2h\cos A). \end{aligned}$$

on déduit de ces trois équations fondamentales :

$$\left.\begin{aligned} T &= \frac{p_0cl + \left(\pi + \frac{1}{2}p_1c\right)a}{l\sin A - h\cos A}, \\ t^2 &= T^2 + 2P(2P - 2T\sin A). \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Les formules 7 ont été établies de même, en prenant seulement les moments par rapport à l'extrémité supérieure.

T prend sa valeur maximum pour $a=2l$, l'inclinaison ayant alors sa plus grande valeur A_0, et l'on a finalement :

$$\left.\begin{aligned} T_0 &= \frac{(p_0 c + 2\pi + p_1 c) l}{l \sin A_0 - h \cos A_0}, \\ t^2 &= T^2 + 2P(2P - 2T \sin A_0). \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

A_0 étant la donnée du problème, on réglera le câble au moyen du treuil de tension, de façon que son inclinaison supérieure ne soit pas inférieure à A_0 quand la benne est au haut de sa course, et l'on sera certain que la tension T_0 sera ainsi atteinte sans jamais être dépassée.

4. On ne peut pas espérer trouver une expression simple et exacte de la tension maximum en fonction de f. Mais on peut en trouver des expressions suffisamment approchées.

La tension supérieure ne varie pas beaucoup quand la benne se déplace. Cela se conçoit *a priori*. En effet, quand la charge oscille au-dessus — ou au-dessous — de sa position moyenne, ce qui tend, par l'effet du bras de levier a, à augmenter — ou à diminuer — la tension supérieure, le câble oscille en même temps, près du point A, au-dessous — ou au-dessus — de sa position moyenne, ce qui tend, par l'effet de l'inclinaison, à diminuer — ou à augmenter — sa valeur.

On peut donc chercher d'abord sa valeur pour la position médiane de la benne.

Or pour $a = l$, la formule 10 devient

$$T = \frac{Pl}{l \sin A - h \cos A}.$$

Si le câble conservait sa forme parabolique de l'état libre, on aurait $\operatorname{tg} A = \frac{h + 2f}{l}$, et la formule deviendrait :

$$T = \frac{P}{2f} m,$$

résultat évident *a priori*.

Mais en réalité le câble s'est abaissé, au milieu, de F en F_0, et s'est relevé vers ses extrémités, sa longueur étant supposée rester constante. Soient A_0, T_0, $OF'_0 = nf$ (n compris entre 1 et 2), les valeurs vraies de l'inclinaison, de la tension et du segment découpé sur la médiane par la tangente à l'extrémité. On a par la formule 10 :

$$\frac{T_0}{T} = \frac{l \sin A - h \cos A}{l \sin A_0 - h \cos A_0} = \frac{2}{n}\sqrt{\frac{l^2 + (h + 2f)^2}{l^2 (h + nf)^2}} = \frac{2}{n},$$

le radical étant très voisin de l'unité (0,988 environ).

Il reste à apprécier n. Si le câble était un fil sans pesanteur, les points F et F_0 se seraient réunis au point I à une distance $FI = 0{,}16f$ environ. En réalité F et F_0 se sont déplacés beaucoup moins. Nous admettons que leur déplacement est seulement de 1/3 du déplacement précité correspondant à une charge infiniment lourde ou à un câble sans pesanteur. Dès lors $n = 1{,}75$; $\frac{2}{n} = 1{,}15$.

Finalement nous écrirons, en augmentant le coefficient pour tenir compte de ce que la tension augmente quand la benne se rapproche, la formule empirique suivante :

$$T_0 = 1{,}20 \frac{P}{2f} m.$$

18° *Câble tracteur.* — La tension du câble tracteur peut être évaluée par excès en supposant qu'il affecte la même courbe parabolique que le câble porteur, car il affecte généralement une courbe moins tendue. Il faut seulement ajouter à sa tension calculée comme s'il était libre, la composante tangentielle du poids mobile sur le plan incliné quand il est au haut de sa course. On a ainsi :

$$T_1 = \frac{p_1 c}{2f} m + 2\pi \frac{h + 2f}{m}.$$

19° *Exemples.* — Appliquées aux exemples de la Porte

de-France et d'Arrigas, ces formules donnent :

	Porte-de-France.		Arrigas.	
Formule (8)	$\alpha_0 = 21°21'$	$T_0 = 12.146$ (*)	$\alpha_0 = -11°20'$	$T_0 = 1.167$
— (11).	$A_0 = 45°47'$	$= 15.560$ (**)	$A_0 = 20°30'$	$= 1.800$
— empirique. .		$= 14.106$		$= 3.400$
— (13).		$T_1 = 2.750$		$T_1 = 289$

Les câbles porteur et tracteur, ayant respectivement, dans le premier cas, des sections de $\frac{5,5}{0,0085} = 647$ et $\frac{1,16}{0,0085} = 136$ millimètres carrés, travailleront donc à $\frac{15560}{647} = 24$ kilogrammes et $\frac{2750}{136} = 20$ kilogrammes, soit aux $\frac{1}{2,5}$ et $\frac{1}{4,5}$ de leurs résistances que l'on peut évaluer à 60 kilogrammes pour le câble porteur en fer et 90 kilogrammes pour le câble tracteur en acier, sans réduction dans le cas actuel puisqu'il n'y a pas d'épissure.

Dans le second exemple, le travail, pour des sections de 100 et de 20, sera de 18 kilogrammes et $14^k,5$, soit 1/5 et 1/6 de la résistance évaluée à 90 kilogrammes.

20° *Résumé*. — Les exemples étudiés présentent les cas extrêmes des pentes et des poids que l'on peut rencontrer dans la pratique. On voit donc que l'on pourrait, dans tous les cas, adopter avec sécurité la formule unique et très simple

$$T = \frac{pc + \pi}{2f} m.$$

sous la réserve — s'il s'agit d'un câble porteur à charge unique, d'y remplacer, cela va de soi, π par $\left(\pi + \frac{1}{2} p_1 c\right)$

(*) M. Brenier trouve 13.000 en se servant de la formule (6).

(**) L'angle 46°47' est très probablement erroné par défaut; il en résulte que la valeur trouvée 15.560 kilogrammes est un peu trop forte.

et de la majorer de 20 p. 100 — s'il s'agit du câble tracteur correspondant, d'y remplacer le second terme $\frac{\pi m}{2f}$, par le suivant, $2\pi\frac{h+2f}{m}$.

21° *Considérations générales.* — Les exemples que nous avons donnés suffisent à montrer tout le parti que l'on peut tirer de l'emploi de câbles aériens pour rendre, soit possible, soit seulement plus économique, le transport des matériaux dans les circonstances difficiles (*).

Des deux principaux systèmes en présence — câble-plan, câble-noria — ce dernier nous paraît devoir être généralement le plus avantageux.

Il est de beaucoup le plus économique. Il y a, il est vrai, un plus grand nombre de bennes; mais le câble tracteur et les treuils de tension sont supprimés, le chariot tenseur lui-même n'est plus indispensable. Le câble unique à son tour pourra être plus léger que le câble porteur d'un plan incliné. Sans doute, à égalité de charge et de flèche, son poids ne sera pas beaucoup moindre, car si, d'un côté, sa tension est moins élevée de 20 p. 100 au moins, de l'autre, sa résistance est réduite de 10 p. 100 au moins par l'épissure. Mais, en premier lieu, la continuité du mouvement et sa vitesse, qui peut aisément atteindre 2 mètres, permettent de réduire la charge; en second lieu, ces câbles comportent des flèches plus

(*) Citons encore le système Muller (Oppermann, *Portefeuille des machines*, 1875) : deux câbles sans fin, marchant parallèlement à la même vitesse, entraînent des wagonnets reposant sur eux par quatre bras articulés. Le déplacement automatique d'un loquet suffit à relever ces bras au moment où les wagonnets, parvenus à leur point d'arrivée, doivent quitter les câbles, pour reposer, par quatre roues, sur une voie ferrée ordinaire.

M. Gourjon étudie le moyen d'exploiter le glacier de la Chavière en descendant ses produits directement à la gare voisine par un câble sans fin, ayant 5.000 mètres de portée, et 2.000 mètres de descente, divisée en deux sections, l'excès de la puissance de la pesanteur servant au sciage mécanique de la glace.

grandes. Le câble porteur a besoin, en effet, d'être très tendu, notamment pour que son point bas ne se trouve pas trop en-dessous de l'horizontale du point d'arrivée, ce qui pourrait causer l'arrêt des bennes avant la fin de leur course (*); le câble-noria, au contraire, fonctionnera d'autant mieux que sa flèche sera plus grande.

Par la continuité de son mouvement, il procure une grande puissance en même temps qu'une grande élasticité de trafic, et une grande facilité soit pour utiliser la force de pesanteur, si elle est en excès, soit pour la compléter, si elle se trouve insuffisante.

Il se prête enfin plus aisément aux transports sur le terrain horizontal avec supports intermédiaires.

Il faut seulement remarquer, en ce qui concerne les dispositions de détail, que le système du Teil, avec paniers fixés à demeure, n'est applicable qu'au cas où la charge peut être réduite en menus matériaux, et que, si les matériaux atteignent, comme à Alzon, la grosseur de moellons, il faut adopter le système de Grenoble, avec poulies d'enroulement posées de plat, précédées et suivies d'un renvoi de câbles et d'une aiguille d'éloignement ou d'approche.

Par contre, si le trafic est très faible, comme à Arrigas, ou s'il se compose de charges lourdes et indivisibles, le câble-plan sera préférable en ce qu'il permettra de réduire la charge permanente du câble.

De même, si la descente est très rapide, comme à Grenoble, ou si, comme à Vajdna-Hyniad, l'installation acquiert une très grande importance, la division du travail, c'est-à-dire l'emploi de câbles distincts pour porter et pour traîner la charge, permettra généralement de résoudre le problème dans de meilleures conditions.

(*) C'est ce qui arrive à Arrigas, lorsque la benne reçoit une charge inférieure à sa charge normale.

22° *Renseignements généraux* (*). — Quel que soit le système auquel on s'arrête, quel que soit l'usage auquel on les destine, le choix des câbles et leur entretien motivent quelques indications générales par lesquelles nous terminerons cette note.

Il convient d'employer des fils d'acier fondu *de première qualité*, relativement durs et homogènes. Les fils de première qualité ne sont pas, en effet, plus chers que les autres, proportionnellement à leur résistance, et ils sont beaucoup plus avantageux comme légèreté et sécurité.

Nous donnons, dans les tableaux B, C, D, les numéros, sections, poids et résistances des fils en usage, ainsi que les diamètres des câbles suivant leur nombre de fils et de torons. Les fils les plus généralement employés sont ceux des numéros 12 à 18, soit des diamètres $1^{mm},8$ à $3^{mm},4$.

Les fils d'acier de première qualité, de ces numéros, doivent pouvoir supporter avant de se rompre, comme résistance, une tension de 125 kilogrammes par millimètre carré, comme élasticité, un allongement minimum de 3 p. 100, comme flexibilité, 12 pliages de 90° dans un étau à lèvres arrondies de 3 millimètres de rayon. Ces nombres seraient 65 — 1 p. 100 et 15 pour des fils de fer des mêmes numéros.

La résistance d'un câble a été généralement trouvée égale à la somme des résistances de ses fils, non compris les fils axiaux, soit du câble, soit des torons (souvent en chanvre d'ailleurs), qui étant rectilignes ne doivent pas entrer dans le calcul. Toutefois, il est d'usage de compter sur une perte de résistance de 1/10 par l'effet du câblage. Cet usage, considéré quelquefois comme un simple surcroît de sécurité ne répondant à rien de réel, nous

(*) Ces renseignements sont extraits des *Annales des mines* (année 1881, Enquête sur les câbles des exploitations minières, rapport de M. Aguillon) et de la notice précitée de la Compagnie de Châtillon-Commentry.

paraît justifié théoriquement, car les fils étant tirés suivant une obliquité mesurée par le rapport de leur longueur à celle du câble, soit 1,10, supportent suivant leur direction réelle un effort supérieur de 1/10 à celui que le câble supporte suivant son axe. Finalement, on peut compter sur des résistances moyennes de 110 kilogrammes (et de 60 kilogrammes) par millimètre carré de fil d'acier (ou de fer) utile, c'est-à-dire enroulé, de qualité supérieure.

La résistance du câble doit être considérée comme réduite encore de 1/10 s'il est épissé, ce qui est toujours le cas des câbles sans fin. L'épissure reste toujours le point faible. La seule épissure admissible est, d'ailleurs, celle qui consiste à décâbler le câble, puis à le recâbler sans en changer la forme extérieure. Elle ne peut être faite que par des ouvriers très exercés.

Le coefficient de sécurité est généralement pris égal à 4, quelquefois à 3 seulement pour les câbles tracteurs, qui, cependant, nous paraissent plus sujets à l'usure et à des variations brusques de tensions. Ce coefficient peut d'ailleurs être pris plus ou moins élevé suivant que le diamètre du câble est plus ou moins fort (les fils pouvant, dans ce dernier cas, travailler plus inégalement) que l'installation est plus ou moins importante, que le câble est mobile ou dormant.

Le métal subit réellement en service une altération moléculaire qui réduit sa résistance et surtout son élasticité. On pourrait donc adopter à la rigueur un coefficient de sécurité un peu inférieur à 3 pour une installation de chantier qui ne serait que provisoire.

Dans les câbles à fils ronds bien fabriqués, ni le fil n'est tordu dans la confection du toron, ni le toron dans celle du câble. La flexibilité augmente avec la diminution du pas de l'hélice soit du fil, soit du toron ; on prend généralement ces pas égaux à 3, pour des fils du diamètre

ordinaire, et pour des diamètres de câble inférieurs à 25 millimètres.

Dans les câbles dits *excelsior*, les fils sont nécessairements tordus; la flexibilité paraît devoir être moindre; enfin le passage à la filière sous une section compliquée peut nuire à l'homogénéité du métal. Ces inconvénients nous paraissent rachetés par les avantages d'une section absolument pleine et d'une surface absolument lisse.

Pour que l'enroulement soit facile, le diamètre de la poulie doit être égal au moins à 100 fois celui du câble, et à 2.000 fois (ou 1.500) celui du fil d'acier (ou de fer). Cet enroulement correspond sur chaque poulie à une perte de tension qu'il est prudent d'évaluer à 1,5 p. 100. Il en résulterait que, rien que pour assurer l'équilibre dynamique d'un câble-noria par le seul effet de la pesanteur, la composante tangentielle de la charge, $2P \sin \alpha$, doit être égale aux 3 p. 100 de la tension moyenne que l'on peut prendre égale à la tension médiane, $\frac{P}{2f}c$ (4), ce qui correspond, la tangente pouvant ici remplacer le sinus, à une pente limite définie par l'équation

$$2Pi = 0,03 \frac{P}{2f} c.$$

Cette pente diminue quand la flèche augmente, et pour $f = \frac{c}{10}$, valeur normale, elle est de 0,075, soit pratiquement de 0,10.

Enfin, l'entretien d'un câble en service exige un graissage fréquent avec des matières *non acides* et semi-liquides. On peut considérer comme très convenable un mélange de trois quarts de goudron végétal et un quart d'huile de pied de bœuf, bien chauffés et intimement brassés, que l'on applique à chaud et à la brosse.

TABLEAU B

Poids et dimensions des fils de fer et d'acier des divers numéros.

NUMÉROS		DIAMÈTRE en millimètres	SECTION en millim. carrés $\omega = \pi \frac{d^2}{4}$	POIDS du mètre de fil en grammes $p = \omega \times 7{,}8$	POIDS par fil enroulé du mètre de câbles en grammes $p' = 1{,}1p$
français	anglais				
P	25	0,5	0,196	1,53	1,68
1	24	0,6	0,287	2,20	2,42
2	23	0,7	0,385	3,00	3,30
3	22	0,8	0,503	3,92	4,31
4	21	0,9	0,636	4,96	5,46
5	20	1,0	0,785	6,12	6,73
6	19	1,1	0,950	7,41	8,15
7	18	1,2	1,114	8,81	9,69
8	»	1,3	1,327	10,35	11,38
9	17	1,4	1,539	12,00	13,20
10	»	1,5	1,767	13,78	15,16
11	16	1,6	2,011	15,68	17,25
12	15	1,8	2,545	19,84	21,82
13	»	2,0	3,142	24,48	26,93
14	14	2,2	3,801	29,64	32,60
15	13	2,4	4,524	35,28	38,81
16	12	2,7	5,725	44,63	49,09
17	11	3,0	7,068	55,13	60,64
18	10	3,4	9,079	70,82	77,90
19	9	3,9	12,045	93,17	102,49
20	8	4,4	15,205	118,59	130,45
»	7	4,6	16,619	129,62	142,58
21	»	4,9	18,857	147,08	161,79
»	6	5,2	21,237	165,63	182,19
22	»	5,4	22,902	178,63	196,49
»	5	5,6	24,630	192,09	211,30
23	»	5,9	27,340	213,24	234,56
24	»	6,4	32,170	250,91	276,00
»	3	6,6	34,212	266,84	293,52
25	»	7,0	38,485	300,19	330,21
»	2	7,2	40,715	317,57	349,33
26	1	7,6	45,365	353,84	389,22
27	0	8,2	52,810	411,91	453,10
28	00	8,8	61,821	474,38	521,82
29	000	9,4	69,398	541,28	595,41
30	0000	10,0	78,541	612,59	673,85

TABLEAU C.

Résistance des fils.

FILS DES FORGES DE CHATILLON ET COMMENTRY (d'après la notice de la Société)

QUALITÉS	RÉSISTANCE A LA TRACTION des fils voisins du n° 12 en kilogr. par millimèt. carrés — Absolue	RÉSISTANCE A LA TRACTION — Moyenne après câblage pour le calcul des câbles	RÉSISTANCE A LA FLEXION — Nombre de pliages (1) entre mâchoires arrondies de 10 millim. de rayon (fil n° 13)
I. Métal doux.	65 à 75k	60k	14
II. Qualité ordinaire. . . .	85 à 95	80	14
III. Qualité à grande résistance.	130 à 140	120	18
IV. Qualité supérieure. . .	150 à 160	140	21
V. Qualité extra-supérieure.	210 à 225	200	23

(1) Leur angle n'est pas défini, nous pensons qu'il est de 90°.

FILS ANGLAIS (résistances généralement admises)

QUALITÉS	RÉSISTANCE absolue	RÉSISTANCE admise dans la pratique	RÉSISTANCES et prix comparés	
Fer au charbon de bois.	67	65	1	1
Acier Bessemer.	76	73	»	»
Acier fondu au Creuset	122	114	1,79	1,76
Acier plough ou de charrue	183	163	2,49	2,88

TABLEAU D.

Coefficients donnant le diamètre des câbles en fonction de celui des fils.

NOMBRE de torons	NOMBRE DE FILS PAR TORONS — 4	5	6	7	8	9
1 (1)	»	2,70	3,00	3,32	3,60	3,96
3	4,81	5,69	5,85	6,97	7,70	8,31
4	5,85	6,53	7,26	8,03	8,83	9,70
5	6,53	7,30	8,10	8,96	9,85	10,69
6	7,26	8,10	9.00	9.96	10,95	11,88
7	8,03	8,96	9,96	11,02	12,11	13,14
8	8,83	9,85	10,95	12,11	13,32	14,45
9	9,70	10,69	11,88	13,14	14,45	»

(1) Pour 1 toron de plus de 9 fils, par exemple de 27, le coefficient est le même que pour un câble de 3 torons ayant le même nombre total de fils, par exemple 3 torons de 9 fils. — De même, pour 8 torons de 4 fils, le coefficient est le même que pour 4 torons de 8 fils.

Nîmes, le 25 juin 1887.

N° 64

COMPTE RENDU

DES EXPÉRIENCES FAITES A BESSÈGES

DU 16 AU 21 MAI 1887

POUR DÉTERMINER LA RÉSISTANCE A L'INCURVATION DES CABLES MÉTALLIQUES.

Par M. DANIEL MURGUE,
Ingénieur de la Compagnie houillère de Bessèges.

La résistance des cordes en chanvre à l'incurvation a été l'objet, au siècle dernier, de travaux importants, devenus classiques, de Amontons et de Coulomb. Ces savants ont été conduits, pour cette grandeur, à l'expression générale :

$$y = \frac{1}{D}(a + bx),$$

x étant la tension ou la charge, D le diamètre de l'incurvation, a et b, deux constantes particulières à chaque corde.

Il y a tout lieu de penser que la proportionnalité en raison inverse du diamètre se maintient pour les câbles métalliques ; l'assimilation, à cet égard, nous a paru tout à fait légitime, ce qui nous a permis de limiter nos expériences à un diamètre unique d'incurvation que nous avons choisi égal à l'unité.

Deux premières tentatives, faites en novembre 1886 et en mars 1887 n'ont donné, malgré tous nos soins, que des résultats irréguliers et discordants. Il serait sans intérêt de les rapporter ici, puisqu'elles n'ont abouti qu'à des échecs répétés; elles ont eu, cependant, pour nous cette conséquence importante de nous rappeler à l'observation stricte de cette règle de toute recherche expérimentale, qu'une grandeur ne peut être déterminée avec certitude qu'à la condition d'être isolée et de ne nécessiter aucune correction.

En mécanique comme en chimie, les dosages par différence doivent être évités.

Cette leçon sévère nous a ramené aux dispositions expérimentales adoptées par Amontons et par Coulomb dans leurs célèbres recherches, dispositions que la *fig.* 1, empruntée aux leçons de mécanique pratique de M. Morin (p. 317) rappellera suffisamment aux lecteurs. Le cylindre en bois C était tenu en suspension par la raideur des deux cordes; le poids additionnel *p* était nécessaire pour déterminer le mouvement de descente, qui devait être uniforme. Si donc, on représente par P le poids du cylindre et si on remarque que le poids additionnel agissant à l'extrémité d'un diamètre, ne doit figurer ici que par sa moitié, on a pour la résistance à l'incurvation des deux

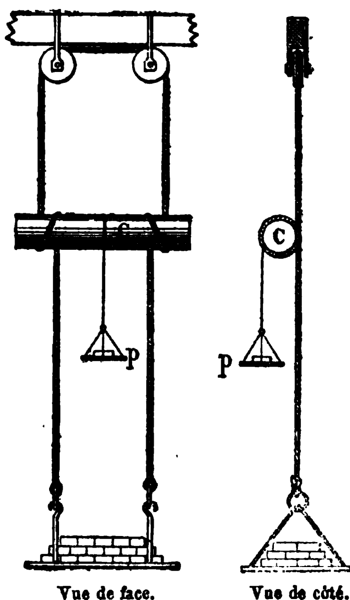


Fig. 1.

cordes :

$$2y = P + \frac{p}{2},$$

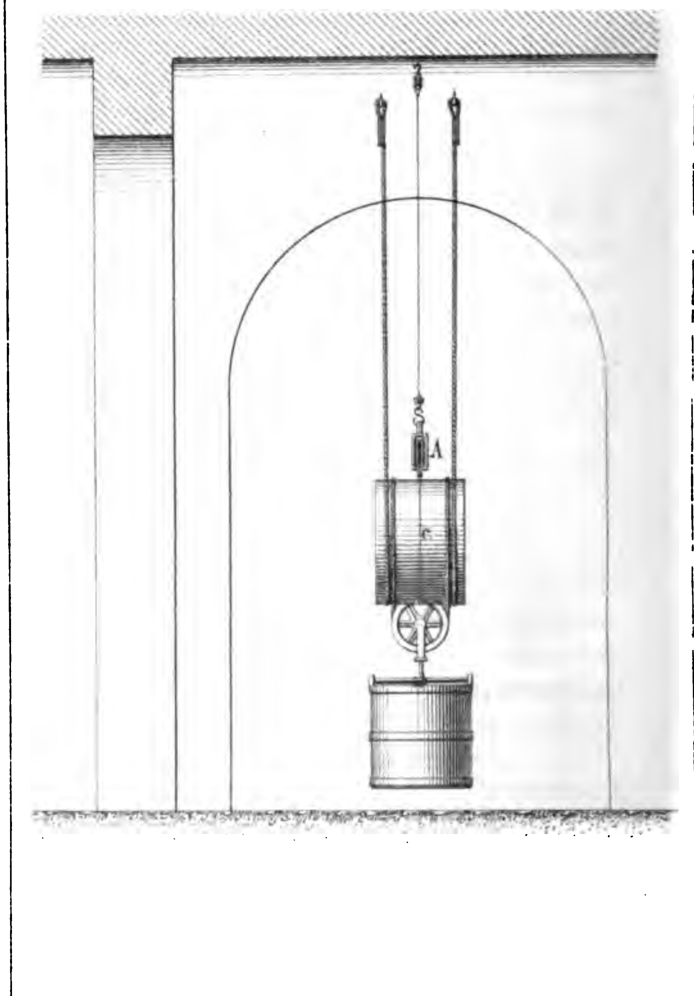
Cette méthode est assurément irréprochable; on n'y entrevoit d'autre résistance passive que la raideur de la ficelle à laquelle est suspendu p, raideur qui ne peut donner lieu qu'à une correction fort minime. Nous l'avons appliquée aux câbles métalliques, en la transformant comme il convenait pour passer de cordes en chanvre souples et légères à nos raides engins de fer et d'acier (*fig.* 2 et 3).

Les deux extrémités du câble en expérience étaient fixées à deux crochets en fer, distants de $0^m,60$ et solidement scellés au-dessus d'un arceau de notre atelier de réparations. La boucle pendante faisait un tour sur un tambour en bois de 1 mètre de diamètre, puis passait sous la gorge d'une poulie de $0^m,40$ supportant une benne où étaient déposés les poids destinés à régler la tension.

Les deux brins, écartés de $0^m,60$ au sommet, de $0^m,40$ dans le bas, présentaient l'obliquité nécessaire pour que, aux extrémités de l'hélice décrite sur le tambour, le câble ne fut point exposé à frotter contre lui-même.

Le tambour, bien que construit d'une façon légère, était beaucoup trop lourd pour que la raideur du câble suffit à le maintenir. L'effort nécessaire, aussi bien pour l'élever que pour ralentir sa descente, devait donc s'exercer de bas en haut. A cet effet, la petite corde c qui remplaçait ici la ficelle d'Amontons et de Coulomb, s'enroulait en dessous du tambour, passait sur une poulie A de $0^m,20$ de diamètre, et supportait à son extrémité le plateau B relié lui-même à un indicateur de Watt (S^{me} Richard).

Le mouvement uniforme était imprimé au système à l'aide d'une moufle à laquelle était suspendue la poulie A et dont le brin libre s'enroulait sur un petit treuil relié à la transmission générale de l'atelier. Une seconde


Fig 2. Vue de face.
A

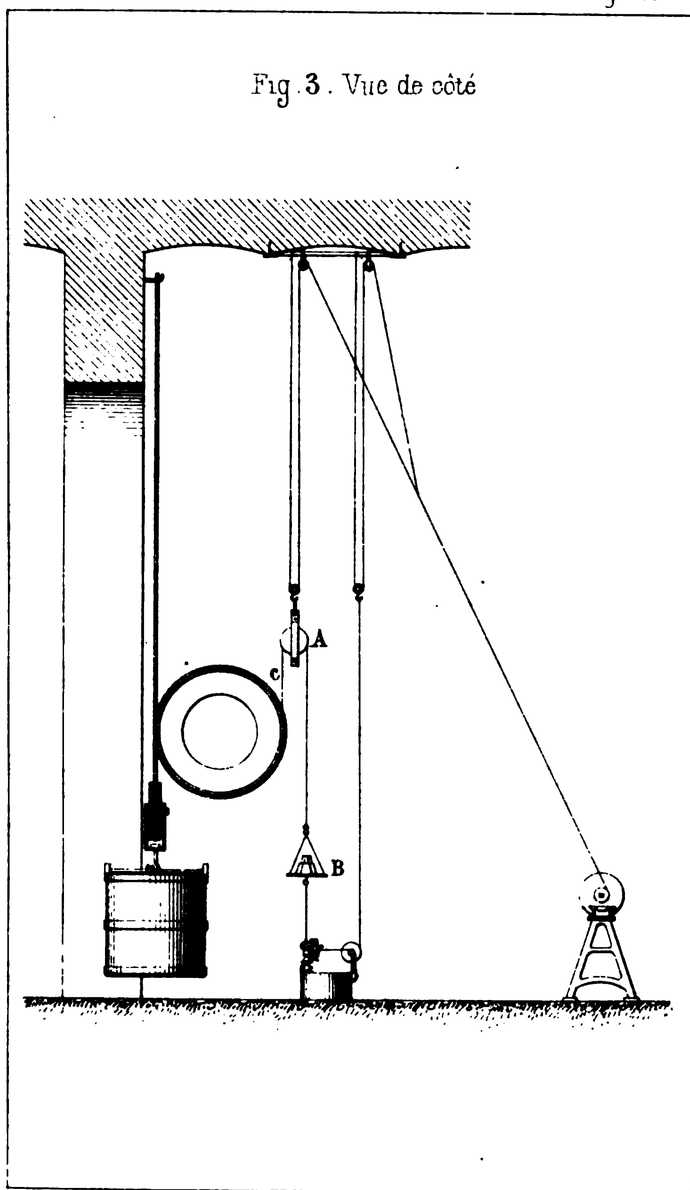


Fig. 3. Vue de côté

moufle conduisait le tambour enregistreur de l'indicateur. On pouvait à volonté monter ou descendre, et cela, avec une vitesse très uniforme et très lente de 40 millimètres par seconde.

Ces détails donnés, notre méthode expérimentale se comprendra aisément :

La tension voulue étant établie à l'aide de poids déposés dans la benne, on procédait d'abord à l'ascension du système. L'effort exercé par la corde c et transmis à l'indicateur qui le traduisait sur le diagramme par une ligne oscillant plus ou moins autour de l'horizontale, était égal à la moitié du poids du tambour et des deux spires de câble qui le surchargent, à la moitié de la double incurvation, et à la résistance passive f, très faible mais non négligeable, due à la poulie A :

$$p = \frac{P}{2} + y + f.$$

De suite après on opérait la descente ; ici, l'incurvation et les résistances passives devenaient retardatrices et on avait :

$$p' = \frac{P}{2} - y - f',$$

effort que l'indicateur enregistrait sous forme d'une seconde horizontale inférieure à la première.

Par suite, l'écart moyen de ces deux lignes, expression de la différence $p - p'$, se trouvait mesurer exactement, sauf les corrections f et f', le double de la résistance cherchée :

$$p - p' = 2y + f + f'.$$

Par cette méthode, toutes les causes d'erreur provenant du tambour, de sa construction, de sa pesée, se trouvaient effacées.

Les résistances f et f' étaient réduites autant qu'il nous avait été possible ; la corde c était très souple, la poulie A, très légère et tournant sur deux pointes.

Cependant, elles gardaient une valeur sensible, qu'une expérience spéciale nous a permis, du reste, de mesurer avec une parfaite exactitude.

Nous n'avons pu réussir à éviter cette correction. Sans doute, on eut pu suspendre l'indicateur à la moufle et tirer directement sur la corde c sans passer par l'intermédiaire de la poulie A; mais, outre la difficulté qu'on eut rencontrée à relever des diagrammes dans des conditions aussi incommodes, je ferai remarquer que notre indicateur ne pouvait enregistrer qu'une fraction assez minime de l'effort total; il était indispensable d'en équilibrer la plus forte part à l'aide de poids; d'où la nécessité d'un renvoi sur la poulie A pour soutenir le plateau B.

On faisait quatre observations par câble, correspondant aux tensions de 400, 800, 1.200 et 1.600 kilogrammes, dont moitié pour chaque brin. On avait ainsi quatre points pour tracer la ligne droite

$$y = a + bx,$$

et déterminer les constantes a et b.

Les opérations étaient assez rapides; le plus long était le chargement de la benne, où on introduisait 400 kilogrammes à chaque fois. Pendant ce temps on remplaçait le papier de l'indicateur et on tirait à la main la ligne de 0 kilogramme. On jugeait très vite du poids à mettre sur le plateau B pour maintenir le style dans le champ du diagramme; cela fait, la montée, le changement de marche et la descente s'opéraient en quelques minutes.

Les diagrammes présentent un aspect remarquable; au lieu de l'horizontale théorique, on a une ligne tremblée, signe assuré de la sensibilité du système, décrivant de brusques et bizarres oscillations en dessus et en dessous de l'ordonnée moyenne. Ces mêmes oscillations se reproduisent à la descente avec un parallélisme presque parfait; on les retrouve pour toutes les tensions. On a ainsi la

preuve quelles sont bien dues à des inégalités dans la raideur des câbles ; inégalités qui suffisent parfois à faire varier la résistance à l'incurvation du simple au double.

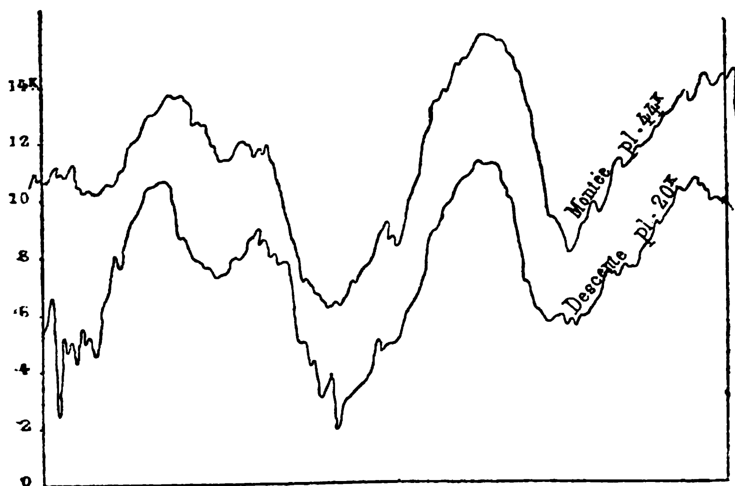


Fig. 4.

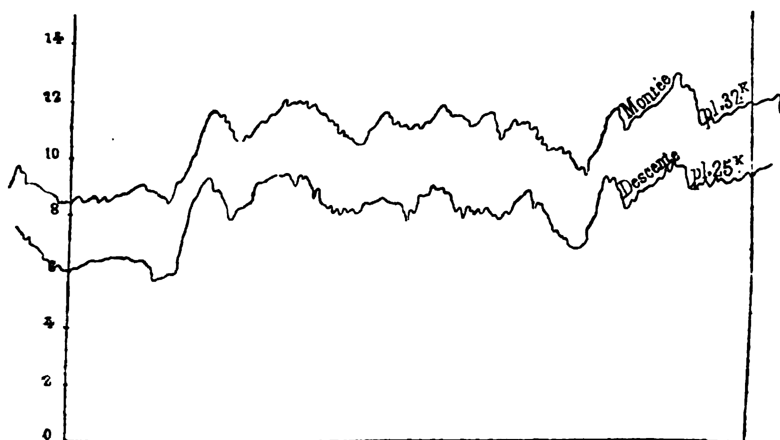


Fig. 5.

Les *fig.* 4 et 5 reproduisent deux de ces diagrammes, l'un correspondant à une raideur fort irrégulière, l'autre

à une résistance assez soutenue. Lorsque, au point d'inflexion sur le tambour, le câble frotte contre lui-même, cette circonstance est révélée de suite par une oscillation rapide du style; le trait perd toute continuité et l'expérience doit être annulée. La *fig.* 6 en donne un exemple.

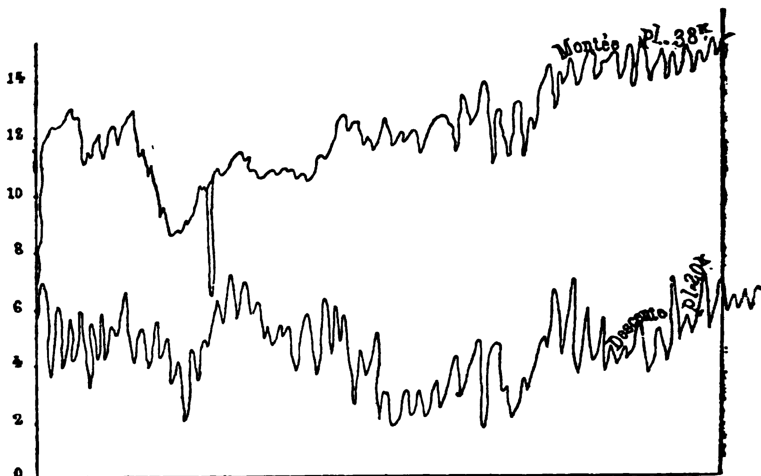


Fig 6.

Au bureau, on limitait le diagramme entre deux ordonnées distantes de 90 millimètres; on mesurait les surfaces au planimètre et on en déduisait les ordonnées moyennes.

La tare de l'indicateur a été établie sur place; on faisait varier la tension de 2 en 2 kilogrammes, depuis 0 jusqu'à 14 kilogrammes, et à chaque fois on tirait une horizontale. Ces lignes, parfaitement équidistantes, ont donné un intervalle de $3^{mm},75$ par kilogramme de tension.

Un point de la plus haute importance était la détermination des résistances passives $f + f'$ engendrées par la poulie A; elles ont été mesurées également sur place, par le procédé suivant. Supprimant le tambour, on sus-

pendait à la corde *c* un poids qui a été successivement de 20, 30, 40 et 50 kilogrammes; on l'équilibrait en partie sur le plateau de façon à maintenir le style à peu près à moitié course. Cela fait, on opérait, comme d'ordinaire une montée et une descente, et on avait ainsi deux lignes plus ou moins ondulées, mais strictement parallèles, dont l'écartement mesurait la résistance passive cherchée.

Les quatre diagrammes ainsi obtenus conduisent très exactement à la formule :

$$f + f' = 0,120 + 0,02915\,Q.$$

L'effort Q correspondant à chaque expérience était déduit des diagrammes en mesurant l'effort moyen à la montée, celui à la descente, et en prenant la moyenne (*).

Nos recherches ont porté sur cinq sortes de câbles métalliques, trois en fer, deux en acier, en usage dans nos houillères; chaque sorte de câble a fait l'objet de deux expériences, l'une sur un bout neuf, l'autre sur un bout vieux (sauf la dernière), ce qui porte à dix le nombre de nos observations.

Nos câbles sont tous composés de 6 torons et présentent une âme centrale en chanvre; il y a aussi une âme en chanvre dans les torons, sauf pour les petits câbles.

Les câbles en fer sont formés de fils n° 17 ($3^{mm},0$); ils comprennent 48 fils pour l'extraction, 42 pour les balances, 24 pour les plans inclinés.

Les câbles en acier sont en fils n° 16 ($2^{mm},7$); ils ont 48 fils pour l'extraction, 30 pour les plans inclinés intérieurs avec machine motrice.

(*) En bonne règle, Q doit être la tension du brin qui s'enroule et non de celui qui se déroule; cette distinction conduirait à compliquer le calcul, mais elle est ici tout à fait inutile.

Ils proviennent tous des usines de Chatillon et Commentry.

Nous avons pu nous procurer aisément des câbles vieux; mais, pour les neufs, on comprend qu'il nous était difficile de prélever, dans un pur intérêt spéculatif, sur des câbles encore vierges de tout service, la longueur de 17 mètres nécessaire pour nos expériences. Nous avons dû considérer comme neufs les bouts de câble qui restent emmagasinés à l'intérieur des tambours; les fils étaient intacts, mais recouverts parfois d'une rouille légère, détail qui a son importance, comme on le verra bientôt.

Nos observations sont résumées dans le tableau suivant dont l'ordonnance est sans doute assez simple pour nous dispenser d'explications.

COMPOSITION DES CABLES	TENSION x	RÉSISTANCE à l'incurvation y — observée	calculée	différence	FORMULES
1. — Câble d'extraction, en fer (neuf).					
6 torons de 8 fils = 48 fils n° 17. — Ames centrale et des torons, en chanvre. — Diamètre du câble, 33mm; du fil, 3mm. — Pas de l'hélice, 262mm; poids par mètre, 3k,220	kilogr. 200	kilogr. 8,970	kilogr. 8,972	kilogr. —0,002	$y = 7{,}012 + 0{,}00980\,x$.
	400	10,935	10,932	+ 0,003	
	600	13,105	12,892	+ 0,213	
	800	14,640	14,852	—0,212	
2. — Même câble (vieux).					
Même composition et même diamètre. — Pas de l'hélice, 270mm; poids par mètre, 3k,150	200	6,995	6,852	+ 0,143	$y = 4{,}876 + 0{,}00988\,x$.
	400	8,685	8,828	—0,143	
	600	10,715	10,804	—0,089	
	800	12,870	12,780	+ 0,090	
3. — Câble de balance, en fer (neuf).					
6 torons de 7 fils = 42 fils n° 17. — Ames centrale et des torons, en chanvre. — Diamètre du câble, 30mm; du fil, 3mm. — Pas de l'hélice, 205mm; poids par mètre, 2k,830	200	7,230	7,193	+ 0,037	$y = 5{,}179 + 0{,}01007\,x$.
	400	9,170	9,207	—0,037	
	600	11,280	11,221	+ 0,059	
	800	13,175	13,235	—0.060	
4. — Même câble (vieux).					
Même composition et même diamètre. — Pas de l'hélice, 225mm; poids par mètre, 2k,740	200	5,660	5,726	—0.066	$y = 4{,}186 + 0{,}00770\,x$.
	400	7,335	7,266	0,069	
	600	8,770	8,806	—0,036	
	800	10.380	10,346	+ 0,034	
5. — Câble de plan incliné, en fer (neuf).					
6 torons de 4 fils = 24 fils n° 17. — Ame centrale, en chanvre, seule. — Diamètre du câble, 21mm; du fil, 3mm. — Pas de l'hélice, 167mm; poids par mètre, 1k,530.	200	4,000	4,120	—0,120	$y = 3{,}256 + 0{,}00432\,x$.
	400	5,105	4,984	+ 0,121	
	600	5,790	5,848	—0,058	
	800	6,772	6,712	+ 0,060	
6. — Même câble (vieux).					
Même composition et même diamètre. — Pas de l'hélice, 165mm; poids par mètre, 1k,450	200	3,910	3,910	0	De $x = 0$ à $x = 528^k$, on a $y = 2{,}780 + 0{,}00563\,x$.
	400	5,040	5,040	0	
	600	6,475	6,475	0	A partir de $x = 528^k$, on a $y = 0{,}550 + 0{,}00987\,x$.
	800	8,450	8,450	0	
7. — Câble d'extraction, en acier (neuf)					
6 torons de 8 fils = 48 fils n° 16. — Ames centrale et des torons, en chanvre. — Diamètre du câble, 30mm; du fil, 2mm,7. — Pas de l'hélice, 250mm; poids par mètre, 2k,550	200	10,710	10,658	+ 0,052	$y = 9{,}044 + 0{,}00807\,x$.
	400	12,220	12,272	—0,052	
	600	13,875	13,886	—0,011	
	800	15,510	15,500	+ 0,010	

COMPOSITION DES CABLES	TENSION x	RÉSISTANCE à l'incurvation y — observée	calculée	différence	FORMULES
8. — Même câble (vieux).					
		kilogr.	kilogr.	kilogr.	
Même composition et même diamètre. — Pas de l'hélice, 270mm ; poids par mètre, 2k,550.	200	7,180	7,122	+0,058	$y = 5{,}966 + 0{,}005\,78\,x$.
	400	8,220	8,278	−0,058	
	600	9,475	9,434	0,041	
	800	10,550	10,590	−0,040	
9. — Câble de plan incliné, en acier (neuf).					
6 torons de 5 fils = 30 fils n° 16. — Ames centrale et des torons, en chanvre. — Diamètre du câble, 22mm ; du fil, 2mm,7. — Pas de l'hélice, 210mm ; poids par mètre, 1k,530.	200	5,040	5,035	+0,005	$y = 3{,}865 + 0{,}005\,65\,x$.
	400	6,200	6,205	−0,005	
	600	7,450	7,375	+0,075	
	800	8,470	8,545	−0,075	
10. — Même câble (lubrifié).					
Expérience répétée sur le même câble après un séjour de 60 heures dans un bain d'huile.	200	3,385	3,343	+0,042	$y = 2{,}641 + 0{,}00351\,x$.
	400	4,005	4,045	−0,040	
	600	4,730	4,747	−0,017	
	800	5,465	5,449	+0,016	

Sauf une, nos observations accusent toutes, avec la plus grande netteté, la loi linéaire :

$$y = a + bx.$$

Pour permettre de juger du degré d'exactitude avec laquelle cette loi est satisfaite, nous avons mis en regard des résultats de l'observation ceux donnés par le calcul ; on voit qu'ils ne diffèrent que de quantités minimes et que l'erreur se produit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. La plus grande correspond au câble dont le diagramme présente les plus fortes oscillations (n° 1).

Quant au câble n° 6, si les deux derniers points donnent un coefficient angulaire plus grand que les deux premiers, nous croyons en voir clairement la cause dans ce fait que ce câble, très usé et très rouillé, n'a jamais subi dans sa longue carrière que des efforts inférieurs à

400 kilogrammes. Lors donc qu'on le soumet à des tensions de 600 et de 800 kilogrammes auxquelles il n'est, pour ainsi dire, pas habitué, des résistances nouvelles entrent en jeu et la raideur s'exagère.

Nos expériences sont trop peu nombreuses pour permettre d'en dégager l'action du diamètre du câble, du diamètre du fil, de la torsion, de la rouille, en un mot, des nombreux paramètres qui exercent leur part d'influence sur une grandeur aussi complexe que la résistance à l'incurvation. On voit clairement que les constantes a et b diminuent avec la grosseur du câble, surtout la première ; on reconnaît de même l'action de la fatigue et de l'usure, mais on ne saurait demander davantage. Nous ne donnerons donc les résultats précédents que comme de simples chiffres à consulter, qui peuvent avoir leur utilité dans de nombreuses circonstances, comme dans celles qui font l'objet de la note précédente de M. Gros.

L'observation la plus intéressante est celle faite sur un bout de câble d'acier de 30 fils qui, sans avoir jamais travaillé, avait fait en magasin un très long séjour. Craignant que la rouille légère qui recouvrait ses fils n'ait nui à sa souplesse, nous lui avons fait subir un bain de 60 heures dans l'huile ; soumis de nouveau à l'expérience, les deux constantes se sont trouvées diminuées dans le rapport de 3 à 2.

Peut-être semblable précaution eut-elle dû être prise pour tous les autres câbles? Mais ce résultat remarquable nous a été connu trop tard. En tout cas, il montre d'une façon irréfutable le très grand intérêt qu'il y a pour les industriels, à entretenir l'intérieur des câbles métalliques parfaitement lubrifié.

Bessèges, le 13 juin 1887.

N° 65

OBSERVATIONS

RELATIVES A UNE

NOTE SUR LES VIADUCS MÉTALLIQUES A GRANDE PORTÉE

PUBLIÉE

dans le Numéro de février 1886 des *Annales des ponts et chaussées.*

Par M. Emile GODFERNAUX, Ingénieur civil,
ancien élève de l'École polytechnique et de l'École des mines.

L'auteur de la note cherche, dans le § 4, à établir une comparaison entre le fer et l'acier, au point de vue de leur emploi à la construction d'un viaduc à grandes portées, et détermine approximativement l'économie de matière qui doit résulter de la substitution de l'acier au fer.

La conclusion de cette recherche est formulée comme il suit, page 325 :

« 14. *Poutres.* — En résumé, l'emploi de l'acier dans les grandes portées aura, toutes choses égales d'ailleurs, les avantages suivants :

« 1° Les hauteurs des poutres s'abaisseront dans le rapport 0,859, ce qui est important pour les hauteurs de 10 mètres et au-dessus.

« 2° Les sections des tables seront réduites dans le rapport 0,812, sensiblement égal au précédent et, par suite, les épaisseurs à river seront notablement réduites. Les sections des barres de treillis seront réduites dans le rapport 0,695.

« 3° Dans l'opération du lançage, les fers, qui travaillent généralement plus qu'en service, auront une plus grande marge pour atteindre la limite d'élasticité (23 ki-

logrammes au lieu de 16 kilogrammes) et, par suite, les poutres en acier reprendront plus sûrement leur forme primitive.

« 4° Enfin, si l'emploi de l'acier est étendu aux poutrelles et longerons, le poids total du tablier en acier sera seulement les 8/10 du même tablier en fer et, comme le rapport des prix de l'acier et du fer mis en place est inférieur au rapport inverse 10/8, il y aura à la fois économie en poids et en argent.

« Ces avantages sont considérables et nous concluons à l'emploi de l'acier pour les grandes portées. »

Il ne semble pas que l'emploi de l'acier puisse conduire, d'une manière générale, à abaisser les hauteurs des poutres dans le rapport 0,859, ni à réduire les sections des tables dans le rapport 0,812, et celles des treillis dans le rapport 0,695. De même on ne peut pas dire que le poids total du tablier en acier sera seulement les 8/10 de celui du même tablier en fer.

L'auteur, comme base de ses calculs, suppose l'égalité de rigidité des deux ouvrages en fer et en acier qu'il compare ainsi que la constance du moment μ; ces deux hypothèses ne sont pas fondées. On n'aperçoit pas la raison pour laquelle un ouvrage en acier doit avoir nécessairement la même rigidité que l'ouvrage en fer qu'il remplace; pour les très grandes portées et notamment celles que l'auteur considère, la plus grande rigidité possible est désirable et l'Ingénieur qui doit se préoccuper à juste titre, dans la rédaction d'un projet de grand viaduc, des flexions que pourra prendre l'ouvrage exécuté sous l'action des charges verticales et du vent, cherchera les dispositions qui lui permettront de réduire ces flexions au minimum et ne s'astreindra certainement pas, dans l'emploi de l'acier, à la règle indiquée par l'auteur relativement à la hauteur comparative des poutres, et qu'il déduit de l'égalité de rigidité supposée.

L'emploi de ce métal ne conduira donc pas à abaisser dans un rapport constant la hauteur des poutres des grands viaducs, par rapport aux hauteurs des poutres du pont en fer correspondant. La hauteur des poutres se déterminera par des considérations toutes différentes, telles que la forme des semelles, leur section qui dépend de cette hauteur, les épaisseurs du métal compatibles avec une bonne rivure, la stabilité de l'ouvrage, etc.

En général une grande hauteur des poutres est économique, et l'on doit se garder, dans la rédaction d'un projet de grand ouvrage, de limiter *à priori* cette hauteur.

On emploie, en Amérique, des poutres notablement plus hautes que sur le continent européen, et cette pratique est généralement justifiée.

Quand au moment μ, il est loin d'être le même dans le pont en acier et dans le pont en fer ; en effet :

Ce moment dépend des poids de la surcharge et du plancher qui sont, il est vrai, les mêmes dans les deux cas, mais il dépend aussi du poids propre de la construction qui est d'autant moindre dans l'acier comparé au fer que les ouvertures sont plus grandes. Dans des ouvrages importants, le poids propre du métal peut dépasser notablement celui de la surcharge et du plancher réunis ; l'erreur commise, en admettant la constance du moment μ, peut alors devenir considérable.

Le moment μ dépend aussi de l'action du vent sur la construction (*) ; cette action sera moindre dans un pont en acier que dans un pont en fer, parce que le premier devra offrir moins de surface en projection verticale que le second.

(*) Dans l'application au viaduc du Viaur, l'auteur a négligé l'action du vent sur les semelles des poutres. Autant que les indications contenues dans la note permettent de faire le calcul, on trouve que cette considération de l'action du vent porterait le travail des semelles sur les piles à environ $10^k,2$ au lieu de $7^k,8$ et augmenterait ainsi le travail indiqué pour cette partie de la construction de 30 p. 100 environ. (Voir page 347.)

Plusieurs éléments concourent donc à diminuer le moment μ dans les ouvrages en acier, et il en résulte une grande différence dans les sections des semelles et dans leur poids ainsi que dans les poids totaux des ponts en fer et des ponts en acier correspondants.

De même, l'effort tranchant n'est pas identique dans les deux ouvrages comparés, puisque cet effort dépend, comme le moment μ, du poids propre de la construction; le rapport indiqué 0,695 qui est déduit de la supposition que les poids sont égaux ne peut donc être exact.

A ces observations il faut ajouter qu'il y a encore divergence entre les Ingénieurs sur la nature de l'acier qu'il convient d'employer dans les constructions, et, par suite, sur le coefficient de travail limite, lequel influe beaucoup sur le poids de l'ouvrage. Après avoir employé des aciers trop durs et qui ont donné des mécomptes, on a diminué peu à peu la résistance de l'acier, à tel point que bientôt si l'on persiste dans cette voie son emploi ne sera pas sensiblement plus avantageux que celui du fer. Il serait désirable d'éviter toute exagération en ce sens et d'admettre pour l'acier des conditions de résistance permettant réellement d'obtenir, de l'emploi de ce métal, les résultats économiques qu'on peut en attendre.

L'emploi de l'acier n'est donc pas encore fixé, et les quelques considérations ci-dessus montrent qu'il ne saurait être possible d'établir définitivement l'économie de poids qui en résultera, puisque tant d'éléments variables entrent en jeu; l'art de l'Ingénieur ne saurait s'enfermer dans des limites aussi étroites que celle qu'indique la note des *Annales*, et nul ne peut prévoir les progrès que l'emploi de l'acier fera réaliser dans les constructions de l'avenir.

Les observations qui précèdent ont uniquement pour

but de mettre les jeunes Ingénieurs en garde contre des formules qui ne leur donneraient pas d'indications exactes relativement à l'emploi de l'acier, et pour leur faire comprendre qu'il n'y a qu'un seul moyen de se rendre compte de l'économie pouvant être réalisée dans les constructions où l'on en ferait usage, c'est de faire une étude complète des deux projets qu'on veut comparer; encore cette comparaison ne sera-t-elle exacte que pour le cas particulier auquel elle se rapportera, dans les conditions données du travail des métaux et pour les types choisis; les résultats qu'elle donnerait pourraient être bien différents si l'on modifiait quelques-unes des conditions de ces projets.

Voici, d'ailleurs, le résultat d'une étude comparative du poids de ponts en acier et en fer de trois ouvertures différentes, qui a conduit aux rapports suivants entre le poids de l'acier et celui du fer:

	OUVERTURES		
	60 mètres	100 mètres	150 mètres
Semelles	0,65	0,69	0,58
Treillis	0,70	0,64	0,60
Poids total	0,74	0,69	0,64

On voit donc que ces rapports ne sont pas constants et ils ne sauraient l'être.

Quoi qu'il en soit, et cela résulte du tableau précédent, on ne peut qu'approuver la conclusion de l'auteur, tout en faisant des réserves sur les calculs qui l'y ont conduit, quand il conseille l'emploi de l'acier pour les grandes ouvertures; on peut même dire que, pour les très grands viaducs, l'emploi de l'acier est seul possible et que sans ce métal le pont colossal actuellement en construction sur le Forth n'aurait pas pu être exécuté.

Paris, le 26 octobre 1887.

N° 66

CHRONIQUE

(Novembre 1887)

Utilisation du courant pour la remonte des bateaux.

Note par M. H. Girardon, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

La chronique des *Annales des ponts et chaussées* du mois de juin 1887 contient une note sur un appareil intitulé *locomotive d'eau*, imaginé par un ingénieur allemand, pour utiliser la vitesse du courant à la remonte des bateaux.

Ainsi que le fait remarquer la note, l'idée n'est pas absolument neuve.

En dehors des simples recherches ou des essais tentés depuis longtemps en France dans la même voie, on peut citer un appareil légèrement différent quant à sa forme, mais qui repose absolument sur le même principe et fonctionne en service régulier au Sault-du-Rhône, dans le département de l'Ain.

Cet appareil fort simple et dont les croquis ci-joints donnent une idée complète, se compose essentiellement d'un bateau plat portant deux grandes roues pendantes et deux tambours N et M.

Le câble *e* qui s'enroule sur le tambour N est fixé à la rive ; le convoi est fixé au câble *d* qui s'enroule sur le tambour M. Deux embrayages manœuvrés par des leviers permettent de rendre folles les roues pendantes ou de leur faire commander alternativement le tambour N et le tambour M. Quand elles sont folles, l'appareil et le convoi sont au repos. Lorsqu'elles commandent le tambour N, le câble *e* s'enroule, et le bateau fonctionnant comme toueur remonte en entraînant le convoi; lorsqu'elles commandent le tambour M, le câble *d* s'enroule, le bateau reste stationnaire et fonctionne comme remorqueur en rappelant le convoi.

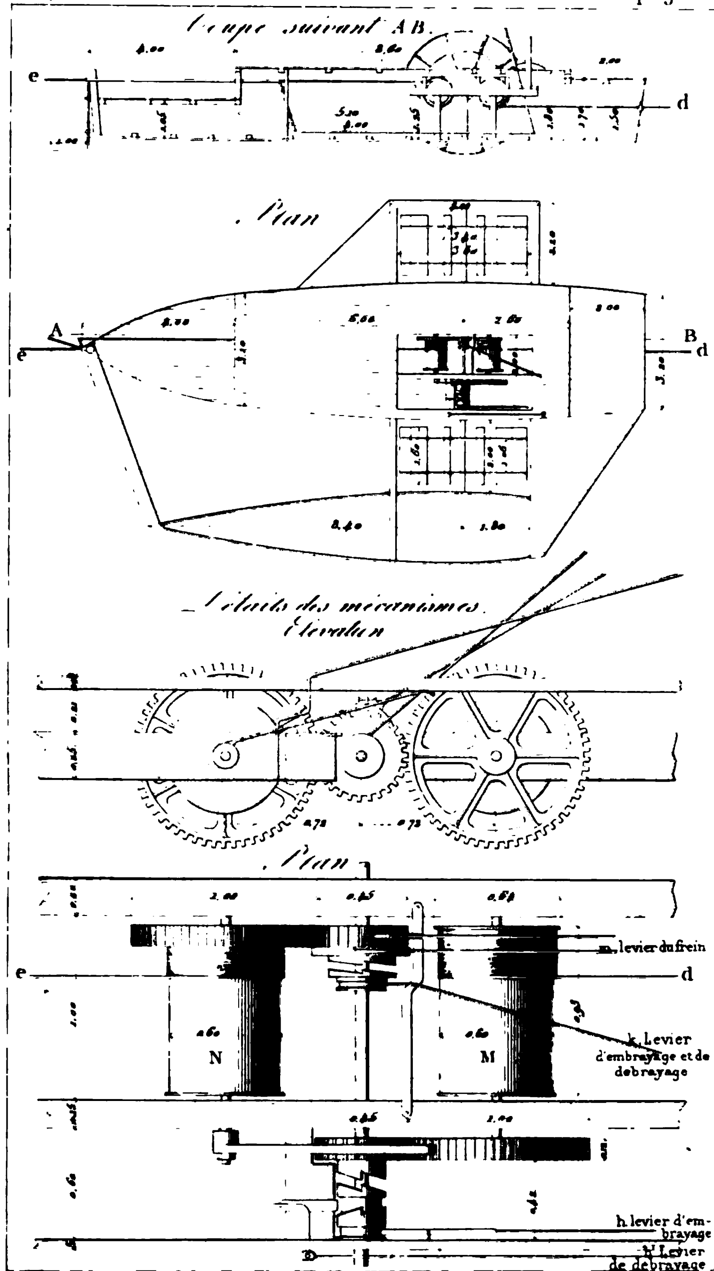
L'une ou l'autre des manœuvres est employée suivant l'état des eaux et la position qu'occupe le convoi par rapport aux chutes.

Un gouvernail placé à l'avant est manœuvré par le levier *l*; il permet d'opérer le déplacement du bateau dans le sens transversal avec la plus grande facilité.

Le petit bateau accouplé au bateau porteur des appareils de remonte a pour but d'empêcher la trop forte inclinaison de l'appareil quand il est pris en écharpe par le courant.

Ce toueur est exploité par un industriel de la localité qui, pour un prix fixé, effectue la remonte des bateaux qui se présentent pour franchir les chutes très rapides qui existent en ce point.

Il est en service régulier depuis neuf ans.



 Gravé par Macquet

N° 67

NOTICE NÉCROLOGIQUE

SUR

M. BELIN

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

Par M. A. MARTIN,
Inspecteur général des ponts et chaussées, en retraite.

Le Corps des ponts et chaussées a récemment perdu l'un de ses anciens membres les plus estimés par l'importance des travaux qu'ils ont laissés derrière eux et par l'éclat de leurs services, M. Belin, Inspecteur Général de première classe, qui vient de s'éteindre à l'âge de quatre-vingt-sept ans, le 1er mai dernier, en son domaine de Saint-Étienne, dans le département de l'Allier, où il s'était retiré après sa mise à la retraite.

Nous avons eu le bonheur, dès le début de notre carrière, de connaître cet ingénieur éminent, et, peu après, d'être appelé sous ses ordres, pour y rester pendant de longues années jusqu'au moment de son entrée au Conseil général des ponts et chaussées.

Nous obéissons donc tout naturellement à la vieille et pieuse tradition de la grande famille des ingénieurs, en même temps qu'à nos sentiments personnels de reconnaissance et de respectueuse affection, en venant retracer

ici, en ces quelques pages, la vie et les travaux de l'un de nos maîtres vénérés, et rendre ainsi un hommage suprême à sa mémoire, si digne d'être conservée dans nos souvenirs et dans ceux des ingénieurs qui nous survivront.

M. Belin (Émile-Fulcrand), né à Paris le 9 mars 1800, descendait d'une ancienne famille originaire de l'Orléanais, qui habitait un petit fief dans les environs de Chambord et dont le chef était pourvu, sous Louis XIV et Louis XV, d'une charge dans la maison militaire du roi. A la suite de revers de fortune, survenus avant l'avènement de Louis XVI, le fief dut être vendu ; la famille fut dispersée, et le père de M. Belin, qui avait embrassé la carrière militaire, s'est retiré, sous la Restauration, avec le grade de chef d'escadron de la garde royale, chevalier de la Légion d'honneur et de Saint-Louis, après avoir fait presque toutes les campagnes du commencement du siècle. Il ne devait laisser aucune fortune à ses enfants ; aussi avait-il eu la sagesse de les élever dans cette pensée virile et fortifiante que leur vie serait ce qu'ils sauraient la faire eux-mêmes par leur travail et leur conduite, si bien que son fils Émile, placé très jeune au lycée de Metz, loin de ses parents fixés alors à Mayence, presque abandonné à lui-même pour ainsi dire, y travailla avec tant d'ardeur qu'il fut reçu à l'École polytechnique avec le numéro 40, en octobre 1818, après une seule année de mathématiques spéciales. La promotion n'était, cette année-là, que de 75 élèves, et le lycée s'y trouvait bien représenté, ainsi qu'il en a toujours été, du reste, jusqu'au jour à jamais néfaste et douloureux où la chère ville de Metz nous a été violemment enlevée !

L'année suivante, M. Belin était classé à la 1re division avec le numéro 22, et il sortait de l'École en octobre 1820 avec le numéro 20, pour entrer à l'École des ponts et

chaussées, dont il est sorti le 1er mai 1823 pour être chargé, dans le département du Cantal, du service de l'arrondissement d'Aurillac.

Deux ans après (le 1er mai 1825) il était nommé ingénieur ordinaire de 2e classe, puis désigné, par une décision du 9 août suivant, pour être employé, à la résidence de Decize, aux travaux du canal latéral à la Loire.

A cette époque, le gouvernement de la Restauration qui avait voulu donner une grande impulsion aux travaux publics, avait décidé l'achèvement des canaux depuis longtemps commencés, et la construction de nouvelles lignes de navigation.

L'Administration eut donc à choisir entre les jeunes ingénieurs qui tous (M. Belin était du nombre) s'étaient empressés de solliciter un poste dans l'un des nouveaux services. Aussi lisons-nous dans la décision précitée du 9 août, du Conseiller d'État Directeur général des ponts et chaussées et des Mines (M. Becquey), ces paroles si encourageantes : « Vous mettrez sans doute du prix, monsieur, à être attaché ainsi à de grands travaux : c'est d'après les témoignages avantageux qui m'ont été donnés sur vos services que je vous ai désigné pour le poste important où vous êtes appelé (*). »

Ce poste de Decize embrassait, en effet, une section étendue du canal, comprenant le pont-aqueduc de Dompierre et le grand pont-canal du Guétin sur l'Allier, qui était certainement le travail le plus considérable qui fût alors à exécuter.

Nous pouvons donc comprendre avec quelle reconnais-

(*) En nous reportant à l'*Annuaire du corps des ponts et chaussées*, pour les années 1826 à 1829, nous trouvons parmi les ingénieurs du canal latéral à la Loire MM. Talabot, Jullien, Didion, camarades et amis de M. Belin, formant ainsi une véritable pléiade d'hommes éminents qui tous devaient plus tard s'illustrer dans l'exécution et la haute administration des chemins de fer.

sante ardeur le jeune ingénieur se mit à l'œuvre et rédigea les projets de ce grand ouvrage, dont il commençait bientôt la construction, mais pour l'abandonner dès le début par suite d'une circonstance singulière et bien imprévue.

A ce moment, le Gouvernement français s'était engagé à faciliter l'exécution d'un vaste programme de travaux publics projetés sur le territoire de la Confédération Argentine, et avait proposé à quelques ingénieurs d'aller dans ce but à Buenos-Ayres. Les offres étaient brillantes et de nature à séduire un jeune homme presque sans famille et qui savait depuis sa plus tendre enfance, on l'a vu plus haut, qu'il n'avait absolument à compter que sur lui seul. Il accueillit donc de suite la proposition qui lui était faite. d'autant qu'il s'y trouvait encouragé par l'un de ses camarades de promotion, qui acceptait aussi la même mission. Il s'occupa sans retard de tous ses préparatifs de départ, et fut immédiatement remplacé au pont du Guétin par M. Jullien.

Ce départ n'eut point lieu, toutefois, par suite d'une révolution survenue dans l'intervalle à Buenos-Ayres, dont le nouveau gouvernement renonça au traité précédemment consenti par la France.

L'Administration s'empressa de replacer M. Belin dans le service du canal latéral à la Loire, mais cette fois à Diou, en le chargeant de la construction du pont-canal de Digoin, pour relier la nouvelle voie navigable avec le canal du Centre.

C'est à cette époque que M. Belin s'est marié dans le département de l'Allier, à Saint-Gérand-le-Puy, avec la sœur d'un jeune magistrat, M. Valleton, qui était fort lié avec plusieurs ingénieurs du canal et devait devenir plus tard conseiller à la Cour de Riom, puis procureur général et premier président de la Cour d'appel d'Angers.

Peu après son mariage, les travaux du pont-canal

furent brusquement suspendus par suite de la révolution de 1830, qui semblait tout d'abord devoir entraîner une conflagration générale en Europe. Il fut alors vivement pressé par la famille de sa jeune femme de solliciter le poste d'ingénieur d'arrondissement du service ordinaire du Département, qui devenait vacant, à la résidence de Moulins, par la retraite du titulaire, et il y fut bientôt appelé par une décision du 20 octobre 1830. Il restait toutefois en même temps attaché au canal latéral à la Loire, « attendu (ce sont les termes de la décision) que cette disposition n'offre pas d'inconvénients à raison de l'avancement des travaux confiés aujourd'hui à votre surveillance et de la proximité à laquelle ils se trouvent de Moulins, où est fixée votre résidence nouvelle. »

Pendant que l'État exécutait et poursuivait ainsi les travaux du canal latéral à la Loire, à l'aval de Digoin jusqu'à Briare, la partie supérieure désignée sous le nom de « canal de Roanne à Digoin » avait fait l'objet d'une concession (Loi du 29 mai 1827 et ordonnance royale du 11 octobre 1830) à une Compagnie industrielle qui avait obtenu le concours empressé de M. Belin, et le nommait bientôt son ingénieur en chef des travaux à la résidence de Roanne, puis membre du Conseil d'exécution de la Compagnie à compter du 1er novembre 1832. Le président du Conseil d'administration, en informant le titulaire de cette nouvelle fonction venant s'ajouter à la première, s'exprimait en ces termes, que nous croyons devoir citer textuellement, sans qu'il soit besoin d'y ajouter aucun commentaire : « Nous ne considérons point cette nomination comme une faveur qui vous soit accordée, mais bien comme un témoignage de notre satisfaction pour votre zèle et les services que vous avez déjà rendus à la Compagnie, nous félicitant, monsieur, d'avoir eu l'occasion de donner aux membres du Conseil d'exécution un collaborateur tel que vous. »

M. Belin justifia pleinement la haute confiance de la Compagnie à laquelle il est resté constamment attaché jusqu'à l'entier achèvement des travaux en 1838, après avoir triomphé de toutes les difficultés rencontrées, qui n'étaient pas sans importance, notamment au point de départ du canal à Roanne même, puis au passage d'Avrilly, au pied du coteau qui menaçait de s'effondrer dans la Loire si on avait voulu en entamer le pied. L'habile ingénieur sut éviter tout danger pour ce passage, en reportant son tracé dans le lit même du fleuve, adoptant ainsi à ce moment une solution hardie, qui, sanctionnée par un succès complet en ce point, devait le conduire à vaincre, par les mêmes procédés, des difficultés d'ordre analogue, mais sur une échelle plus vaste lorsqu'il eut, quelques années plus tard, à faire passer le canal latéral à la Garonne au pied des coteaux très mobiles de Malause, sur la rive droite de la Garonne, près du confluent du Tarn.

L'administration supérieure ne perdait pas de vue les services si réels rendus ainsi, en définitive, au pays lui-même par l'ingénieur du canal de Roanne à Digoin (*), et elle l'avait promu, dès le 17 septembre 1835, à la première classe du grade d'ingénieur ordinaire au corps des ponts et chaussées.

Cette promotion, depuis longtemps justifiée aux yeux de tous, avait encore développé l'activité et l'ardeur au travail qui caractérisaient si éminemment l'homme, absolument dévoué à ses devoirs, dont nous essayons de retracer la vie.

A ce moment de sa carrière, on sollicitait de toutes parts, soit de l'État, soit des départements, des concessions de ponts suspendus, dont nous ne possédions en-

(*) Ce canal, on le sait, a été racheté par l'État, en vertu d'une loi du 28 juillet 1860.

core que quelques spécimens en France avant 1830, et plusieurs de ces concessionnaires s'adressèrent à lui, même de pays voisins.

Il accepta sans hésitation ce surcroît de travail et eut ainsi à faire construire directement et presque simultanément les ponts de Chambilly, du Fourneau, de Decize, sur la Loire, dont le premier reste cité comme donnant « un bon type pour trois travées, avec des ouvertures de 46 (*) et 58 mètres (**); puis le pont de Casal, sur le Pô, et enfin, le pont si remarquable de la Caille, au-dessus des gorges d'Ussès, en Savoie, près d'Annecy, dont la travée de 182 mètres d'ouverture se trouve élevée à 148 mètres au-dessus du torrent (***). Les tours rondes à créneaux qui supportent les câbles ont 4 mètres de diamètre, 40 mètres de hauteur, et les pierres en sont appareillées avec un soin tout exceptionnel.

Ce beau pont, que les touristes ne manquent jamais d'aller admirer dès qu'ils arrivent à Annecy, a été inauguré avec un plein succès le 10 juin 1839, un an à peine après l'achèvement complet du canal de Roanne à Digoin, dont les travaux n'avaient jamais subi le moindre retard dans leur marche régulière et rapide, malgré les occupations si multiples, si diverses que leur ingénieur s'était imposées et que nous n'avons pas toutes rappelées encore. Nous lisons, en effet, dans une lettre du 7 juin 1838 de M. Legrand, l'éminent Directeur général des Ponts et Chaussées et des Mines de cette époque, qu'il avait, peu de temps auparavant, chargé M. Belin de faire des recherches sur le tracé et les moyens d'alimentation d'un canal à point de partage joignant le Rhône à la Loire par Saint-Étienne et qu'il le remerciait de son envoi, sous la date du 31 mai précédent, des résultats de ces recher-

(*-**-***) *Cours de construction des ponts* de M. l'inspecteur général Croizette-Desnoyers (t. II, p. 509) (1885).

ches. La lettre se terminait ainsi : « Vous m'avez, en même temps, annoncé que vous pourriez rentrer au service de l'administration à dater du 1er juillet prochain.

« J'ai l'intention de mettre à profit très prochainement votre zèle et votre talent, et de vous assigner une position telle que vous la souhaitez. Vous recevrez, à partir du 1er juillet, sur les fonds du budget des ponts et chaussées, le traitement attribué à votre grade d'Ingénieur ordinaire de 1re classe. »

Nous ne saurions rien ajouter qui pût mieux montrer en quelle haute estime l'Administration supérieure tenait déjà M. Belin, et quel désir manifeste elle avait de le conserver au service direct de l'État, alors surtout que le Gouvernement projetait de grands travaux sur plusieurs points du territoire.

Dès ce moment M. Legrand, qui savait si bien étudier et suivre les hommes placés sous sa haute direction, puis les apprécier à leur véritable valeur, toujours avec bienveillance mais aussi avec une sûreté remarquable, songeait à le charger d'un service d'ingénieur en chef de la plus haute importance, celui de l'une des deux sections du canal latéral à la Garonne, dont l'exécution venait d'être décrétée par les Pouvoirs publics. (Loi du 3 juillet 1838). Et, en effet, M. Belin fut bientôt désigné, par un arrêté ministériel du 21 du même mois, pour remplir les fonctions d'Ingénieur en chef de la 1re section, à la résidence de Toulouse, et nommé Ingénieur en chef de 2e classe par ordonnance royale du 26 décembre suivant.

Mais avant d'aller plus loin, nous devons rappeler ici un incident qui a exercé une certaine influence sur la carrière de M. Belin, en agissant, ainsi que nous allons le voir, sur l'esprit de M. Legrand.

Quinze jours avant l'arrêté précité du 21, une loi du 6 juillet avait concédé un chemin de fer, de Paris au Havre, à une Compagnie industrielle dont le président,

M. le comte Jaubert qui était lié avec M. Baude, alors député de Roanne, et connaissait bien ainsi la réputation de M. Belin, s'était empressé de lui proposer la direction de ce chemin de fer de Paris à la mer.

Une telle proposition était sans doute bien séduisante, mais après la lettre du 7 juin, si particulièrement flatteuse pour lui, l'Ingénieur des ponts et chaussées qui n'ignorait pas ainsi les dispositions bienveillantes de l'Administration à son égard, ne pouvait hésiter et il fit connaître sans retard sa détermination à M. le comte Jaubert, qui en informa de suite M. Legrand. Celui-ci en fut très touché et satisfait, ainsi que nous pouvons le constater par ce post-scriptum, *entièrement de sa main*, placé au bas de la dépêche officielle du 23 juillet, portant organisation du service du canal latéral à la Garonne. « Je saisis avec empressement, monsieur, cette occasion de vous remercier d'avoir préféré le service du canal latéral à la Garonne à celui du chemin de fer du Havre. Vous avez donné, dans cette circonstance, la preuve d'un noble désintéressement, dont je chercherai toujours à vous tenir compte. »

Ces lignes nous montrent surabondamment quel prix le Directeur général des Ponts et chaussées attachait aux services qu'il attendait du jeune ingénieur en chef dans le poste important qu'il venait de lui confier.

Les travaux du canal furent bientôt entrepris avec vigueur sur tout le parcours et les ingénieurs de la section, en présence des nombreux problèmes fort délicats qu'ils avaient à résoudre, tant pour le tracé que pour l'exécution, se trouvèrent toujours fort heureux et reconnaissants de se sentir si sûrement guidés par un chef si expérimenté et bienveillant, doué d'un esprit aussi vif que fécond pour indiquer les solutions les meilleures à adopter.

Nous nous bornerons à citer parmi les principales de

celles-ci qui pourraient être encore, pour les jeunes ingénieurs, l'objet d'une étude attentive et fructueuse, les solutions proposées et adoptées : 1° pour la prise d'eau à Toulouse à l'extrémité du canal de Brienne, au moyen d'un vaste bassin d'épuration creusé sur le côté gauche du bief extrême du canal du Midi avant sa descente en Garonne à l'aval du barrage des moulins du Bazacle ;

2° Pour le type des écluses, avec dérivation latérale les contournant, afin d'assurer, sans fatiguer les portes, une alimentation provenant uniquement de la tête du canal, dont la longueur totale atteint, on le sait, 204 kilomètres (ligne principale et embranchement de Montauban) ;

3° Pour l'établissement du canal dans le lit même du fleuve, au pied des coteaux ébouleux de Malause et de Bourdon, que nous avons déjà cité à propos du passage devant Avrilly du canal de Roanne à Digoin ;

4° Pour la traversée du Tarn par le grand pont-canal du Cacor, en amont de Moissac, dont les fondations ont donné lieu à de réelles difficultés pour être descendues jusqu'à près de 12 mètres, ainsi que la nécessité s'en est révélée en cours d'exécution, alors que les sondages avaient fait espérer que l'on pourrait fonder sur un rocher compact à 6 mètres au plus sous l'étiage, dans l'enceinte de bâtardeaux établis en conséquence.

Nous aurions bien d'autres points à signaler, mais ce serait alors la description complète de l'œuvre qu'il nous faudrait écrire, en y annexant les dessins, d'autant que quelques-uns de ceux-ci seraient la reproduction d'originaux dus en entier à la main fort habile de M. Belin, et que l'inspecteur divisionnaire (M. de Baudre), chargé de l'inspection du canal, montrait dans ses tournées avec une sorte d'enthousiasme aux ingénieurs qu'il visitait.

Pendant que l'exécution du canal, au cours de laquelle M. Belin fut nommé (le 9 mai 1839) chevalier de la Légion

d'honneur, se poursuivait activement, le Gouvernement avait prescrit l'étude de plusieurs lignes de chemins de fer, entre autres de celle de l'Océan à la Méditerranée, dont les ingénieurs du canal latéral furent chargés par un arrêté ministériel du 15 août 1842. Cet arrêté plaçait en même temps la section dudit chemin de fer s'étendant de la limite des départements de Lot-et-Garonne et de Tarn-et-Garonne à Toulouse exclusivement, puis la section de Toulouse à Carcassonne, sous la direction de M. Belin.

Dès que les avant-projets de ces deux sections importantes eurent été soumis à l'administration supérieure, M. Legrand, alors sous-secrétaire d'État des Travaux publics, lui écrivit, sous la date du 24 juillet 1845, une lettre, qu'il nous paraît juste de transcrire ici, en partie tout au moins : « Monsieur, le Conseil général des ponts et chaussées, dans l'examen qu'il a fait des avant-projets que vous avez rédigés pour le chemin de fer de l'Océan à la Méditerranée, a exprimé le vœu que des témoignages de satisfaction vous fussent adressés pour le talent remarquable dont vous avez donné de nouvelles preuves dans la rédaction de ces projets.

« Je m'associe bien volontiers, monsieur, à ces témoignages de satisfaction et je suis charmé d'avoir à vous transmettre l'expression....... »

M. Belin avait été promu à la première classe de son grade par arrêté du 10 décembre 1844.

Les avant-projets, complètement terminés ainsi jusqu'à la ville de Carcassonne, une décision du 7 août 1845 invita M. Belin à reviser en entier les deux tracés étudiés dans un autre service, qui n'avait pu suffisamment compléter son travail, pour la partie au delà du même chemin de fer comprise entre Béziers et Cette, l'un passant par Pézenas, l'autre par Agde, en prescrivant de réunir pour

chaque direction « les documents statistiques relatifs à la circulation des voyageurs et des marchandises. »

Quelques mois plus tard, les avants-projets revisés et complétés étaient soumis à l'Administration et donnaient lieu de sa part à de nouveaux témoignages semblables aux précédents.

A la suite de toutes ces études ainsi accomplies, l'État put concéder la ligne de Bordeaux à Cette avec l'embranchement de Castres, par une loi du 21 juin 1846, à une Compagnie, qui s'empressa de demander le concours des deux ingénieurs en chef du canal latéral à la Garonne, MM. Job et Belin, les auteurs de ces études si hautement appréciées. Ces messieurs furent immédiatement autorisés à prendre part aux travaux dudit chemin de fer, dont la direction, à Paris, fut confiée, le 23 juillet 1846, à M. Didion, leur ancien camarade, nous l'avons vu plus haut, au canal latéral à la Loire. Il était impossible de faire de meilleurs choix et la réunion de tels hommes était bien de nature à faire espérer au pays une prompte et parfaite exécution de la ligne concédée.

Il n'en devait pas être ainsi, malheureusement.

« On était alors (comme l'a si bien dit M. Noblemaire, dans la Notice nécrologique sur M. Didion) au milieu de cette longue période d'enfantement de laquelle ne devait sortir qu'en 1852, après bien des soubresauts et des catastrophes, l'organisation actuelle de nos chemins de fer, période d'ardente ébullition où, à des engouements irréfléchis, succédaient d'injustifiables défiances. Le crédit des Compagnies naissantes n'était pas encore assez solidement établi pour résister à de pareilles bourrasques ; la crise financière et commerciale de 1847, avant-coureur de la crise politique bien autrement redoutable de 1848, fait subir à toutes les valeurs une énorme dépréciation ; plusieurs Compagnies, Bordeaux à Cette, Lyon à Avignon, sombrent dans la tourmente, et, hors d'état

de remplir leurs engagements, sont déclarées déchues (*). »

Au même moment et à la suite de longues discussions pour le choix du tracé au passage de Lyon, en vue de la jonction de la ligne venant de Paris par la rive droite de la Saône, avec la ligne se dirigeant sur Avignon et Marseille par la rive gauche du Rhône, l'État avait dû se charger de l'exécution des travaux d'infrastructure du chemin de fer de Lyon dans la traversée de cette ville, moyennant le remboursement par la Compagnie des dépenses qu'il aurait faites, jusqu'à concurrence, toutefois, d'un chiffre maximum limité pour elle à 24 millions, l'excédent, s'il s'en produisait, devant rester exclusivement à la charge du Trésor public.

Un service spécial fut immédiatement créé pour l'exécution de ces travaux importants et confié à M. Belin par une décision ministérielle du 18 septembre 1847.

Mais à peine les premiers projets sont-ils dressés et approuvés que « la révolution de 1848 éclate, avec son inévitable cortège de bouleversements et de ruines. Au mouvement fécond des dernières années succède cette agitation dans le vide, apanage des temps troublés (**). »

Les ingénieurs, au lieu de pouvoir procéder à l'organisation de véritables chantiers produisant un travail régulier, fructueux pour le pays, sont alors réduits à s'occuper d'ouvrir à la hâte des ateliers dits nationaux qui devaient être, on ne saurait l'oublier, absolument improductifs et bientôt démoralisateurs pour les ouvriers. Les meilleurs, qui eussent voulu vraiment travailler pour n'avoir pas à rougir chaque soir en recevant un salaire qu'ils savaient bien n'avoir pas réellement gagné (nous

(*) Voir *Annales des ponts et chaussées* (t. V, 1er semestre de 1883, p. 428).

(**) Voir comme ci-dessus *Annales des ponts et chaussées*, t. V, même page.

l'avons pu constater) étaient empêchés, en effet, par une minorité violente d'accomplir loyalement leur devoir en honnêtes gens.

Cette triste inaction, si profondément pénible pour un esprit aussi vif et laborieux, menaçait en se prolongeant d'ébranler sa santé, lorsque fort heureusement M. Belin, à la grande joie de tous ses amis, de tous ses collègues, fut élevé, par un décret du 30 avril 1850, au grade d'Inspecteur divisionnaire des ponts et chaussées, après avoir été promu le 10 décembre précédent au grade d'Officier de la Légion d'honneur. Il fut chargé alors de la septième inspection, comprenant les départements situés entre la rive gauche du Rhône et l'Italie, à partir de celui de Vaucluse inclusivement, puis la navigation du Rhône depuis la Durance jusqu'à la mer, et le chemin de fer de Paris sur la Méditerranée, depuis la sortie de Lyon jusqu'à Marseille.

En 1856, à la suite de la lettre Impériale du 19 juillet, provoquée, on se le rappelle, par les ravages si considérables des crues exceptionnelles qui dévastèrent les vallées de nos grands fleuves, il fut (tout en conservant son inspection, la 15e, alors comprenant la navigation de la Loire, etc.) placé à la tête du service des « Études et Travaux à exécuter dans le bassin du Rhône, à l'effet d'en améliorer le régime et de prévenir les inondations », service qu'il a conservé pendant toute sa durée jusqu'à la fin de 1862, quoiqu'il eût été élevé au grade d'inspecteur général de 1re classe par décret du 12 janvier 1861.

Les résultats de ces études ont été consignés par lui avec une clarté et une autorité très remarquables aux yeux de tous, dans un grand rapport du 30 novembre 1862, qui a été autographié par ordre de l'Administration, comme celui rédigé par M. Comoy et relatif aux études semblables faites pour le bassin de la Loire.

M. Belin avait, du reste, coopéré en partie à ce dernier

travail comme président d'une Commission d'Inspecteurs Généraux chargée de parcourir toute la Loire avec M. Comoy, en vue d'arrêter d'un commun accord les principes généraux des solutions à proposer.

La lettre du 19 juillet se basant sur l'action exercée par la digue de Pinay lors des crues de la Loire et précisément sur celle qui venait d'avoir lieu, préconisait un système de réservoirs artificiels qui arrêteraient, dans les régions supérieures des bassins, une partie du volume des crues.

Tout d'abord, l'idée pouvait être sans doute très séduisante et frapper les esprits, même sagaces, à la condition toutefois qu'elle pût être d'une application efficace, même au prix de dépenses plus ou moins considérables, ce qu'il importait de bien examiner à fond ainsi qu'il était prescrit.

Or, les études effectuées pour les deux bassins précités et dont les résultats ont été mis en pleine lumière avec la plus loyale indépendance dans les rapports que nous venons de signaler, ont démontré clairement (*) « l'impuissance du système des retenues artificielles, soit pour supprimer tout à fait les inondations, soit seulement pour atténuer la hauteur des crues dans une proportion telle, que leurs ravages soient sensiblement diminués », et qu'il fallait, pour restreindre autant que possible ces derniers, recourir à d'autres moyens, que M. Belin a très nettement indiqués dans la suite de son mémoire si complet et si lumineux (p. 117 et suivantes).

Pendant qu'il dirigeait ce grand service d'études dans le bassin du Rhône, l'Administration lui avait renvoyé, pour avoir son avis, un avant-projet précédemment dressé, en conformité d'une décision ministérielle du

(*) Voir notamment le rapport pour le bassin du Rhône du 30 novembre 1862 (p. 116).

23 octobre 1856, par M. l'Inspecteur général Vallée qui, dans un ouvrage publié en 1843, avait émis l'idée « d'utiliser le lac Léman comme réservoir, au moyen d'un grand barrage à son extrémité aval, dans le double but de modérer les crues du Rhône et d'améliorer sa navigation. »

Cette demande d'avis témoignait de la haute confiance de l'Administration supérieure, mais pouvait éveiller peut-être quelques susceptibilités, que la modestie de M. Belin, bien à tort probablement, redoutait de voir surgir.

Sur sa demande formelle, une commission composée des quatre Inspecteurs généraux, Directeurs des bassins de nos grands fleuves et de l'Inspecteur de la navigation du Rhône, fut alors désignée par une décision du 25 mai 1858 pour examiner, sous la présidence de M. Gayant, vice-président du Conseil général des ponts et chaussées, les questions soulevées. Le rapport confié par cette commission à la plume exercée de M. Belin et rédigé sous la date du 15 juillet suivant, mit en pleine lumière dans les termes les plus courtois et les plus nets, les conditions particulières dans lesquelles il pourrait y avoir lieu de donner suite à telles ou telles parties des propositions formulées par cet avant-projet.

Ce rapport et celui du 30 novembre 1862, que nous avons déjà rappelé plus haut, seront toujours, nous le croyons, consultés avec fruit comme des modèles et des guides très sûrs par les ingénieurs qui auront à préparer des études et des projets pour l'amélioration de nos fleuves, au double point de vue de leur navigabilité et de l'atténuation de leurs ravages en temps de grandes crues.

Nous voudrions pouvoir citer ici les autres travaux, fort nombreux de M. Belin au Conseil général des ponts et chaussées pendant les vingt années qu'il lui a été donné d'y siéger et au cours desquelles il a été élevé au

grade de Commandeur de la Légion d'honneur dès le 13 août 1864. Nous y trouverions de nouvelles preuves éclatantes de la valeur réelle des services qu'il n'a jamais cessé de rendre à notre pays avec tant de dévouement et de distinction jusqu'au jour de sa retraite, à laquelle il a été admis par un décret du 9 mars 1870.

Il lui était donc permis, au terme de sa belle carrière d'ingénieur, d'emporter cette pensée fortifiante et consolante que, dans la retraite comme dans la vie active, il pouvait, à l'exemple de ses devanciers les plus distingués, compter sur les sentiments de haute estime de l'Administration comme sur l'affection de tous ses collègues, et il se félicitait de pouvoir goûter enfin les douceurs d'une vie de repos près de ses fils affectionnés.

Mais l'année terrible s'avançait et la guerre devait bientôt éclater, le jetant dans des inquiétudes profondes et douloureuses, successivement et cruellement aggravées par les événements de Sedan, de Metz, et enfin de Paris.

Deux de ses fils faisaient alors campagne, en effet, l'un en sa qualité d'Officier dans l'armée régulière, où il est aujourd'hui colonel d'un régiment d'infanterie, l'autre, alors jeune substitut, comme engagé volontaire.

Une famille amie de longue date, qui habitait le Midi, l'avait immédiatement pressé de venir auprès d'elle, et, dans son pénible isolement (il avait perdu son excellente compagne quelques années avant 1870), il se rendit à cette affectueuse invitation.

Les soins empressés et cordialement dévoués dont il y était entouré l'aidèrent à supporter, sans atteinte pour sa santé, les angoisses communes à tant de familles en ces temps douloureux et néfastes, et il put enfin, après avoir retrouvé ses deux fils sains et saufs, revenir s'établir dans l'Allier avec son fils aîné, aujourd'hui conseiller général du département.

De nouveaux chagrins, bien plus profonds, hélas ! devaient l'y atteindre et assombrir la fin de sa vie : le brisement imprévu des carrières brillantes de l'aîné et du plus jeune de ses trois fils, tous deux avocats généraux, l'un à la Cour d'Angers, l'autre à la Cour de Rennes ; puis, il y a quelques mois seulement, la perte cruelle de son unique petite-fille, soudainement enlevée en pleine jeunesse à l'affection de tous, laissant deux enfants en bas âge !

Ce dernier coup surtout l'avait fortement ébranlé, sans atteindre toutefois aucune de ses belles facultés, qu'il a pu conserver jusqu'au moment suprême.

Il s'est endormi avec une entière sérénité, après avoir reçu les secours de la Religion, laissant à ses enfants cette suprême consolation, que rien ne peut remplacer, et à nous tous le grand exemple d'une longue vie de labeur constant et de dévouement absolu à la chose publique.

Puissent ces souvenirs précieux atténuer la douleur de ses fils, qu'il a tant aimés, et de tous ses collègues et amis, qui ne pourront jamais oublier l'homme éminent que nous venons de perdre !!...

Le Mans, le 19 septembre 1887.

N° 68

NOTICE NÉCROLOGIQUE

SUR

M. CAMBUZAT

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

Par M. CHARIÉ-MARSAINES,
Inspecteur général des ponts et chaussées en retraite.

La mort vient de frapper dans la retraite où il vivait depuis quelques années un ingénieur distingué, un homme des plus honorables dans la personne de M. Cambuzat, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite, décédé à Clamecy le 7 juillet dernier. La commission des *Annales des ponts et chaussées* ayant bien voulu penser à moi pour retracer dans ce recueil les principaux traits d'une vie si noblement employée, je n'ai pas cru, malgré l'insuffisance de mes forces, devoir décliner cette tâche doublement obligatoire pour moi, et par les souvenirs d'une collaboration de plusieurs années, et plus encore par ceux d'une longue amitié qui ne s'est jamais démentie.

L'ingénieur qui fait l'objet de la présente notice, M. Jacques-Edme Cambuzat, naquit à Asnières (département de l'Yonne) le 21 janvier 1814, d'une famille obscure, mais dont le chef très intelligent et très laborieux avait su conquérir une honorable aisance en même temps que

l'estime de ses concitoyens. Placé à douze ans au collège d'Avallon, le jeune Cambuzat y fit de bonnes études et fut admis en 1833 à l'École polytechnique dont il sortit en 1835 pour entrer à celle des ponts et chaussées. Envoyé en mission comme élève, en 1836, dans le département de l'Ardèche, puis en 1837 dans celui de Lot-et-Garonne, il ne resta dans ce dernier que quelques mois et fut immédiatement appelé au service de la navigation de la Dordogne dans le département de ce nom pour y remplir les fonctions d'ingénieur ordinaire. Placé sous les ordres d'un ingénieur en chef très distingué, M. Vauthier, qui a laissé des travaux estimés sur l'hydraulique, M. Cambuzat en profita pour perfectionner son instruction dans cette branche de la science des ingénieurs et dans ses applications. Aussi, en quittant ce service, fut-il appelé, en juin 1839, à celui du canal latéral à la Garonne où s'exécutaient alors de grands et beaux ouvrages. Il s'y distingua comme dans ses précédents services par son intelligente et consciencieuse activité. Mais quel que fût l'intérêt de ces travaux, M. Cambuzat, qui éprouvait un vif désir de se rapprocher de son pays natal, accepta avec empressement la résidence de Clamecy, où il fut appelé le 1er mars 1844 et attaché au service ordinaire du département de la Nièvre en même temps qu'à celui du canal du Nivernais. Lorsqu'il y arriva, ce canal était livré à la navigation depuis quelques années ; mais il restait à y exécuter des travaux de perfectionnement et M. Cambuzat s'en occupa avec soin et succès, notamment de ceux pour la consolidation et l'agrandissement des réservoirs, ainsi que des études relatives à l'augmentation des ressources alimentaires du point de partage.

En septembre 1849, il fut appelé à la résidence d'Abbeville et attaché au service ordinaire du département de la Somme en même temps qu'à celui du canal et de la

navigation de la Somme, ce dernier comprenant celui des ports de la baie de Somme. Puis, en février 1853, attaché au service de contrôle et de surveillance des chemins de fer qui forment aujourd'hui le réseau de la compagnie d'Orléans, il fut appelé à la résidence de Paris dans laquelle il fut définitivement confirmé par la décision du 1[er] janvier 1854, qui l'attachait au service ordinaire du département de la Seine. Dans ce service, il coopéra aux grands et beaux travaux qui s'exécutaient alors, soit pour l'assainissement et l'embellissement de la capitale, soit pour la mettre en communication avec les promenades et parcs établis dans son pourtour. Ce fut lui notamment qui fut chargé de l'exécution de la voie magistrale qui réunit l'arc de triomphe de l'Étoile avec le bois de Boulogne et qui, inaugurée en mai 1855 sous le nom d'avenue de l'Impératrice, est appelée aujourd'hui avenue du Bois de Boulogne. C'est à la fin de ce beau travail rapidement et parfaitement exécuté qu'il obtint la décoration de la Légion d'honneur.

Élevé en août 1856 au grade d'ingénieur en chef, M. Cambuzat fut chargé du service de la navigation de l'Yonne et du canal du Nivernais et, en outre, du service d'études et de travaux à exécuter sur la rivière d'Yonne depuis sa source jusqu'à son embouchure. Cette période est, on peut le dire, la plus hrillante de sa carrière d'ingénieur; mais, ponr en faire comprendre l'importance, quelques mots d'explication sont nécessaires.

A ce moment, on s'occupait très activement de perfectionner les voies navigables qui aboutissent à la ville de Paris et notamment la haute Seine et ses affluents dont l'Yonne est un des principaux, soit par le fort volume des eaux qu'elle y amène, soit par la quantité des produits de toute espèce, bois, bestiaux, vins, etc., dont elle est le véhicule. Cette voie a, d'ailleurs, une importance excep-

tionnelle par le rôle qu'elle joue dans la grande ligne navigable de Marseille au Havre qui, établie par le Rhône, la Saône et le canal de Bourgogne, se continue à partir de l'extrémité de ce canal par l'Yonne entre Laroche et Montereau, enfin par la Seine de Montereau à Paris, et au delà jusqu'à la mer. Or, l'Yonne au-dessous de Laroche et la Seine entre Montereau et Paris présentaient une navigation fort défectueuse et intermittente, parce qu'elle ne pouvait se faire pendant une très grande partie de l'année qu'à l'aide d'éclusées ou crues factices produites par la fermeture et le débouchage successifs des pertuis et barrages établis à cet effet. L'amélioration de cet état de choses était depuis lougtemps l'objet d'études et de recherches de la part des ingénieurs, lorsque l'invention des barrages *à fermettes mobiles* de M. l'inspecteur général Poirée vint ouvrir sur cet objet des horizons nouveaux. Ce système de barrage, imaginé par son auteur pour la traversée de l'Yonne et de la Loire par le canal du Nivernais, fut promptement reconnu comme susceptible de nombreuses applications, et lorsque les expériences faites, l'une en 1834, l'autre en 1837, sur les barrages établis à Basseville près de Clamecy et à Decize en eurent démontré le succès, l'administration n'hésita plus à en faire étudier l'application à la navigation de la Seine. A cet effet, M. Poirée fut chargé du service de cette rivière depuis la limite du département de l'Aube jusqu'à Rouen. D'un autre côté, cette application était également autorisèe sur l'Yonne, non pas pour supprimer le régime des éclusées, mesure radicale à laquelle on ne songeait encore que faiblement à cette époque, mais pour améliorer ce régime en établissant des barrages mobiles qui permissent de donner plus de force aux éclusées. Les bons résultats produits par ce système engagèrent à en faire une plus large application en créant de nouveaux barrages entre Auxerre et Montereau, en accolant des

écluses aux barrages déjà créés entre Laroche et Sens, enfin en créant dans le Morvand le grand réservoir des Settons, dont il sera question ci-après. La loi du 31 mai 1846 qui édictait ces dispositions avait également pour objet l'amélioration de la navigation de la Seine. Pour celle-ci un autre système de barrage mobile, celui dit à *hausses mobiles*, inventé par M. l'ingénieur en chef Chanoine et essayé entre temps, avait pareillement donné des résultats satisfaisants. Ce système fut donc employé concurremment avec celui de M. Poirée et, sans entrer dans des détails qui ne sauraient trouver place dans cette notice, nous devons dire qu'au mois de septembre 1874, il existait 12 barrages mobiles avec écluses sur la Seine, et sur l'Yonne 25 dont 22 avec écluses et 3 placés en tête de dérivations. Toutefois, cet ensemble d'ouvrages qui améliorait notablement le régime des éclusées n'avait point encore résolu complètement le problème de l'établissement de la navigation continue. Cet établissement avait été le principal motif de la décision ministérielle du 1er avril 1867, qui chargeait M. Cambuzat du service de la navigation de la Seine entre Paris et Montereau en même temps qu'elle lui conservait celui de la navigation de l'Yonne depuis Montereau jusqu'à Auxerre. Grâce aux ouvrages énumérés ci-dessus, la navigation intermittente de la Seine était, dès le mois de septembre 1871, transformée en navigation continue sous la direction successive de MM. Chanoine et Cambuzat, et celle de l'Yonne de Montereau à Auxerre le fut en 1874 par M. Cambuzat seul. Cette transformation avait, dans sa partie matérielle, exigé beaucoup de soins, boaucoup de travaux de détail (*), notamment l'addition de passerelles mobiles à fèrmettes en amont des déversoirs à

(*) M. Cambuzat a fait lui-même l'exposé de ces travaux dans une notice insérée aux *Annales des ponts et chaussées* (mars 1873, page 177).

hausses pour assurer le fonctionnement des pièces qui auraient dû être automobiles; mais elle présentait, en outre, une partie morale non moins difficile que la première, exigeant beaucoup de démarches, beaucoup de discussions avec le commerce et la marine de l'Yonne accoutumés de tout temps au régime des éclusées et dont il fallait modifier les idées et les habitudes en les éclairant sur leurs véritables intérêts. Cette seconde partie de la tâche fut accomplie avec non moins de succès que la première par M. Cambuzat, grâce à son caractère conciliant et à l'influence qu'il avait su acquérir sur la classe des flotteurs et des mariniers. C'est certainement à lui que l'on doit attribuer pour la plus grande partie le prompt aplanissement des difficultés que présentait cette utile transformation (*).

Au nombre des études faites par M. Cambuzat, nous ne pouvons omettre celles relatives aux moyens de préserver la vallée de l'Yonne du retour des inondations qui l'avaient désolée à plusieurs reprises depuis le commencement du siècle actuel, notamment en 1836 et 1856. Le résultat de ces études fut tel que des félicitations lui furent adressées en 1868 par M. le Ministre des travaux publics, sur la proposition de M. l'inspecteur général Mary, chargé de la direction de l'ensemble des études dans le bassin de la Seine.

Enfin, parmi les grands travaux dont le service a été confié à M. Cambuzat, nous devons une mention particulière au réservoir des Settons. Ce réservoir situé dans la vallée de la Cure près de Montsanche en Morvand est, au

(*) Nous ne saurions omettre ici les noms des ingénieurs qui ont coopéré comme ingénieurs ordinaires à l'établissement de la navigation continue entre Paris et Auxerre. Ce sont MM. de Lagréné, Garceau, Boulé, Maurice Lévy, Théodore Lévy, Pille, Marini, Humblot, de Dartein, Remise et Chigot.

point de vue de la quantité d'eau qu'il contient, le plus important des ouvrages de ce genre qui existent en France, nulle localité n'ayant été mieux préparée par la nature pour recevoir un grand approvisionnement d'eau. En effet, avec un barrage de 20 mètres de hauteur seulement au-dessus du seuil de la bonde de fond, il contient 22 milllons de mètres cubes d'eau. Or, les deux plus grands réservoirs qui existent en France, celui de Saint-Féréol au canal de Languedoc et celui de Grosbois au canal de Bourgogne, contiennent à peine chacun 10 millions de mètres cubes avec des digues de 30 et 32 mètres de hauteur. Du reste, l'emplacement des Settons avait été depuis longtemps signalé dans les études faites pour approvisionner, dans les parties hautes de l'Yonne et de ses affluents, de grandes masses d'eau destinées à fortifier en été les éclusées. Une proposition formelle dans ce sens avait même été faite dès l'année 1785. Nous-même, lorsqu'en 1838, chargé des travaux du point de partage du canal du Nivernais et faisant des études pour en augmenter les ressources alimentaires, nous crûmes devoir aller visiter cet emplacement, nous fûmes, comme tous ceux qui l'avaient examiné avant nous, frappé de son admirable adaptation à l'établissement d'un vaste réservoir; mais ayant reconnu de suite qu'il ne pouvait être utilisé par le service dont nous étions chargé qu'au moyen d'une rigole dont la dépense ajoutée à celle du réservoir lui-même eût été excessive, nous crûmes devoir renoncer à en faire l'objet d'aucune proposition. Plus tard, lorsque l'exécution en fut décidée par la loi du 31 mai 1846, ce fut uniquement en vue d'améliorer la navigation de l'Yonne au-dessous de Cravant par la création d'approvisionnements d'eau destinés à son alimentation. C'est en vertu de cette loi que l'on rédigea le projet du réservoir des Settons, projet qui fut, en vertu de décisions de l'administration supérieure, modifié à

plusieurs reprises par les différents ingénieurs chargés successivement de ce service. Quant à l'exécution des travaux, elle fut également confiée à plusieurs ingénieurs avant d'arriver dans les mains de M. Cambuzat. Commencés en 1854, ces travaux lui furent confiés en 1856 et c'est sous sa direction qu'ils furent terminés en 1858. Si, eu égard au grand nombre d'ingénieurs qui y ont coopéré, le mérite de ce grand ouvrage ne peut être attribué exclusivement à aucun d'eux (*), on peut dire avec justice que la principale part en revient à M. Cambuzat.

Élevé par décision du 30 avril 1873 au grade d'inspecteur général, il fut chargé successivement et à deux reprises différentes des cinquième et quatorzième arrondissements d'inspection. Il est superflu de dire qu'il apporta dans ses nouvelles fonctions le même zèle et la même impartialité consciencieuse que dans les précédentes. Il ne le sera peut-être pas d'ajouter qu'il eut plus d'une fois à lutter pour que les projets des travaux neufs à exécuter dans sa division fussent conçus uniquement en vue de l'intérêt général. En juillet 1876, ses services furent récompensés par sa promotion au grade d'officier de la Légion d'honneur. Enfin, au moment où il pouvait légitimement espérer de voir sa période d'activité prolongée par sa promotion à la première classe, il fut atteint par la limite d'âge et admis à la retraite; mais en même temps l'administration reconnaissant sa compétence dans les questions concernant les rivières et les canaux, le nommait membre de la commission supérieure pour l'aménagement et l'utilisation des eaux.

(*) Le service du réservoir des Settons a été confié successivement à MM. les ingénieurs en chef Vignon, Hernoux, Lepeuple, Guyot et Cambuzat, et à MM. Rozat de Mandres, Olry de Labry et Marini, alors ingénieurs ordinaires.

Nous ne saurions terminer cette notice sur M. Cambuzat sans dire quelques mots de sa vie privée, qui n'est pas moins digne d'attirer l'attention que ses travaux comme ingénieur.

Elevé dans une famille où les croyances religieuses étaient ferventes, il se montra de bonne heure fidèle aux traditions paternelles et se distingua par son attachement à tous ses devoirs. Déjà sur les bancs du collège, il était cité comme le modèle d'un enfant pieux et, devenu homme, il marcha toujours dans la même voie. L'amour de sa profession et celui de la religion dans laquelle il était né, tels ont été les deux principes moteurs de son existence. Avec de tels mobiles, il ne pouvait manquer d'avoir les qualités d'un époux accompli et d'un excellent chef de famille. Uni à une femme digne de lui (M[lle] Tenaille-Saligny), entouré d'enfants qui lui ont toujours donné la plus complète satisfaction, on pourrait dire qu'il a été, dans toute l'acception du mot, un homme heureux si une grave déception n'était venue, en le privant d'un avancement auquel il avait certainement des titres fort sérieux, attrister la fin de son existence. Ce fut pour lui une nouvelle occasion de se montrer tel qu'il était, c'est-à-dire chrétien conséquent, en se livrant de plus en plus à la pratique du bien qui avait été la pensée dominante de toute sa vie : consacrant aux œuvres de charité la majeure partie de son temps et une notable partie de sa fortune, on peut dire que sa mort a été un deuil public. Je dirai plus, et sans crainte d'être démenti : Cambuzat a été vraiment le *justum et tenacem propositi virum* : c'était un caractère. Aussi a-t-il laissé dans le cœur de ses amis et dans la mémoire de ses concitoyens un souvenir qui ne saurait s'effacer.

Corbigny, le 9 septembre 1887.

N° 69

LE
PRIX DE REVIENT SUR LES CHEMINS DE FER
ET
LA RÉPARTITION DU TRAFIC

Par M. NOBLEMAIRE, ingénieur en chef des mines,
directeur de la Compagnie des chemins de fer de P.-L.-M.

M. l'inspecteur général Ricour a publié dans les *Annales des ponts et chaussées* (livraison d'août 1887) une note fort intéressante sur le prix de revient des transports sur les chemins de fer français.

A sa conclusion finale, qu'il faut essayer de réduire ce prix de revient en présence de la situation menaçante que finirait par créer à l'État et aux compagnies l'exécution trop rapide d'un grand nombre de lignes inutiles ou tout au moins improductives, nous nous associons sans réserves; mais nous ne pouvons partager complètement ses appréciations sur le fond même de la question.

Les conséquences, logiquement déduites de la formule qu'il s'est donnée, sont exactes, si cette formule est elle-même exacte; elles ne le sont plus si la formule est contestable ou incomplète.

Nous nous proposons de la compléter par l'adjonction d'un élément important négligé dans la note qui nous occupe. Cela nous paraît d'autant plus nécessaire que la

très légitime notoriété de son auteur dans le monde des chemins de fer donne à ses appréciations une importance toute spéciale.

De l'examen comparatif des résultats statistiques publiés, pour les exercices 1883 et 1884, par le Ministre des travaux publics, pour deux cent dix lignes du réseau français (27.000 kilomètres), M. Ricour a déduit une formule donnant la relation entre la dépense D et la recette R d'exploitation, d'une ligne de longueur donnée L

$$D = 6.125^f \times L + \frac{39}{100} R. \qquad (1)$$

Il y a longtemps qu'un travail sommaire du même genre nous a conduit à nous servir de la formule très voisine et plus simple

$$D = 6.000^f L + \frac{40}{100} R. \qquad (2)$$

Mais une formule de ce genre, très suffisante pour un premier aperçu, ne l'est plus dès que l'on veut s'en servir pour entrer dans les détails, pour comparer deux réseaux entre eux, ou, dans un même réseau, deux lignes entre elles.

M. Ricour fait observer, d'ailleurs, avec infiniment de raison, que, pour apprécier les résultats généraux d'une exploitation, c'est s'exposer à de graves erreurs que de considérer que le *coefficient* d'exploitation $\frac{D}{R}$; ce coefficient n'a, en effet, aucune valeur absolue.

Le seul élément qui permette d'apprécier exactement l'exploitation d'une ligne déterminée, c'est le prix de revient de la tonne kilométrique de marchandises, ou, plus généralement, de l'*unité kilométrique*, en assimulant 1 tonne à 1 voyageur, ce qui est admis assez couramment, parce que c'est commode et, en somme, pas très éloigné de la vérité sur la plupart des lignes.

Ce prix de revient peut se déduire de la formule précédente, en mettant en évidence un facteur fort important, la *fréquentation.*

Soit, en effet, T le tonnage kilométrique total, c'est-à-dire le produit du nombre total d'unités (tonnes, voyageurs, etc.) par leur parcours respectif.

L la longueur de la ligne considérée,

$\frac{T}{L}$ le tonnage annuel rapporté à la longueur de la ligne; c'est ce qu'on appelle la *fréquentation* F de la ligne,

p le prix de revient d'une unité kilométrique.

On a évidemment, pour la dépense totale d'exploitation, $D = Tp$.

D'autre part, l'expérience de l'époque actuelle (1883-1884) montre que le produit d'une unité kilométrique sur l'ensemble des six grands réseaux est d'environ $0^f,055$ (il varie de $0^f,0517$ Nord à $0^f,0647$ Midi).

On a donc, pour la recette totale de l'exploitation, $R = 0^f,055T$.

En substituant ces valeurs dans l'équation première,

$$D = 6135^f L + 0,39\ R,$$

on a

$$Tp = 6125^f L + 0,39,\ 0^f,055\ T,$$

$$p = 6135^f \frac{L}{T} + 0,0215,$$

ou en exprimant tout en centimes, unité usuelle des tarifs et des prix de revient,

$$p = 2^c,15 + \frac{613,500}{F}, \qquad (3)$$

ou plus simplement, d'après la formule (2),

$$p = 2^c,2 + \frac{600,000}{F}. \qquad (4)$$

Cette formnle montre bien l'influence de la *fréquen-*

tation d'une ligne puisque

Suivant que la fréquentation sera F.	50.000	100.000	200.000	500.000	1.000.000	2.000.000
Ce qui, avec les tarifs actuels (5c,5 environ), correspond à une recette kilométrique annuelle de	2.750f	5.500f	11.000	27.500	55.000	110.000
Le prix de revient (4) deviendra p =.	14c,2	8c,2	5c,2	3c,4	2c,8	2c,5

Mais elle ne tient pas compte, et c'est l'omission que nous tenons à relever, d'un autre élément qui joue, lui aussi, un rôle fort important dans le prix de revient et tout à fait prépondérant quand on veut comparer une ligne à une autre, nous voulons parler des *déclivités*.

La conséquence de cette omission dans la note que noms examinons ne se fait pas attendre :

« De quelque façon (p. 157) que le trafic se partage entre les divers groupes de lignes d'un réseau, pourvu que la fréquentation générale soit la même, le prix de revient de l'unité reste invariable. »

Et plus loin (p. 160) :

« Si deux gares extrêmes sont reliées par deux lignes de même longueur, l'une à profil facile, l'autre à profil accidenté, il est indifférent, dans l'état actuel de répartition du trafic, de faire suivre l'une ou l'autre direction, pourvu que la fréquentation de chaque ligne ne subisse que de légères variations. »

Ces conclusions « qui peuvent paraître singulières et inattendues » sont la conséquence forcée de l'application à des lignes les unes faciles, les autres accidentées, d'une formule qui *ne tient pas compte des déclivités*.

Il nous semble donc bien évident que :

1° Les formules (1) ou (2) ne sont pas la « représentation fidèle à l'abri de toute hypothèse » des faits (p. 148);

2° Si la formule (2) peut « fournir un terme de comparaison nettement définie » (p. 153) pour une ligne déterminée, voire même pour un même réseau, dont le profil moyen ne change pas beaucoup d'une année à une année voisine,

elle ne peut aucunement le fournir pour deux lignes ou pour deux réseaux différents, pour comparer, par exemple, le réseau du Nord, qui n'a que des lignes de plaines, au réseau P.-L.-M., qui traverse le Jura, les Cévennes, les Alpes.

Il est donc indispensable de faire entrer les *déclivités* dans la formule du prix de revient si l'on veut en faire usage pour comparer avec quelque exactitude les réseaux entre eux.

Cela nous est particulièrement facile, car, à la suite d'études longues et minutieuses, dont le mécanisme et le résultat font l'objet d'une note déjà classique de M. Amiot, insérée dans les *Annales des mines* (5ᵉ livraison de 1879), nous avons déterminé, d'après les résultats comptables de l'exploitation de chacune des cinquante-cinq lignes qui composaient alors le réseau P.-L.-M., le prix de revient de la tonne kilométrique en fonction de la fréquentation et du profil.

Cette formule, déduite des résultats effectifs d'un réseau, est-elle applicable à tous? Nous le croyons. Dans un même réseau, est-elle applicable aveuglément à toutes les lignes qui le composent? Nous n'oserions être aussi affirmatifs, en raison et de certaines circonstances locales et de l'incertitude assez grande, somme toute, qui règne dans la répartition par lignes, de la dépense totale d'exploitation d'un réseau, au point de vue, en particulier, de la répartition des frais des gares communes; mais elle donne, dans la pratique, une idée suffisamment exacte de la réalité, et nous croyons difficile de la remplacer par une formule plus simple ni plus approchée; c'est la suivante :

$$p = \left(1^c{,}46 + \frac{303{,}680}{F}\right)(1 + 0{,}05\,i),$$

ou, plus simplement, pour l'application :

$$p = \left(1^c{,}5 + \frac{300\,000}{F}\right)(1 + 0{,}05\,i). \quad (5)$$

C'est elle qu'il nous parait nécessaire de substituer à la formule de M. Ricour :

$$(4) \qquad p = 2^{c},2 + \frac{600\,000}{F},$$

dès que l'on veut *comparer* entre eux des lignes ou des réseaux divers.

Il est aisé de se rendre compte, d'après cette formule (5), de l'influence énorme des déclivités.

Pour une même fréquentation F.

Le prix de revient, qui est pour $i = 0 = 1^{c},5 + \frac{300\,000}{F}$

devient pour $i = 10^{mm}$ par mètre $= 2^{c},25 + \frac{455\,000}{F}$

20^{mm} par mètre $= 3^{c} + \frac{607\,000}{F}$

30^{mm} par mètre $= 3^{c},75 + \frac{860\,000}{F}$

Et, pour mettre en évidence la double influence de la *fréquentation* et de la *déclivité*, nous n'avons qu'à reproduire ici le tableau du mémoire précité de M. Amiot :

Pour des fréquentations F..	36.500	73.000	219.000	365.000	730.000	1.460.000	∞
Qui, avec les tarifs actuels (5c,5 environ), correspondent à une recette kilométrique annuelle de.	2.000f	4.000f	12.000f	20.000f	40.000f	80 000f	∞
Le prix de revient p sera :							
pour $i =$ 0	10c.4	6c,2	3c,2	2c,5	2c	1c,7	1c,4
10	12,2	7,8	4,3	3,5	2,9	2,5	2,2
20	14	9,3	5,5	4,5	3,7	3,3	2,9
30	15,9	10,9	6,6	5,5	4,6	4,1	3,6

Nous ne suivrons pas la note que nous venons d'essayer de compléter, dans la comparaison qu'elle fait des divers grands réseaux à celui de l'État, au point de vue du prix de revient de l'unité de trafic, calculé d'après la formule (4). Cette comparaison est forcément inexacte ; cela résulte de ce que nous venons de dire. Pour la faire exacte, et, par conséquent, pour pouvoir en tirer des conclusions quelconques, il faudrait avoir pour chacun d'eux une déclivité moyenne, et nous n'avons pas, en ce

moment, à notre disposition cet élément d'une détermination assez délicate d'ailleurs.

Contentons-nous, à titre de spécimen, de voir, pour un réseau déterminé, celui que nous connaissons le mieux, la marche suivie depuis quelques années. Nous prendrons pour sa déclivité moyenne $i = 8$ (*). La formule (5) nous donnera les résultats suivants, sinon complètement exacts, du moins assurément comparables entre eux :

	1883	1884	1885	1886
Longueur. L	6.471^{km}	7.293^{km}	7.587^{km}	7.734^{km}
Recette totale. . . . . . R	333.520.606	321.618.630	312.091.917	304.095.029
Dépense totale. . . . . . D	166.060.602	156.527.813	146.458.655	137.987.826
. . . . . $\frac{D}{R}$	49,79 p. 100	48,66 p. 100	46,93 p. 100	45,38 p. 100
Tonnage kilométrique utile (marchandise, voyageurs, etc.) . . . . . . T	6.277.266.000	5.919.337.000	5.674.540.000	5.489.475.000
Fréquentation . . . $\frac{T}{L} = F$	970.000	812.000	748.000	710.000
Prix de revient calculé (5) p	2^c,53	2^c,62	2^c,66	2^c,69
Prix de revient réel. . . $\frac{D}{T}$	2 ,65	2 ,66	2 ,58	2 ,51
Différence entre le calcul et la réalité.	+0 ,12	+0 ,04	—0 ,08	—0 ,18

M. Ricour veut bien constater (p. 167) que, pour 1883 et 1884, les résultats de l'exploitation du réseau P.-L.-M. sont de 2,9 p. 100 et de 9,5 p. 100 inférieurs à la moyenne

(*) Pour calculer cette déclivité générale moyenne, on a pris comme déclivité de chaque section de relais de machine la rampe maxima qu'elle comporte dans l'un ou l'autre sens, pourvu qu'elle atteigne au moins 10 p. 100 de la longueur de la section. La déclivité moyenne d'une ligne s'obtient en multipliant la déclivité des relais par leur longueur et divisant la somme des produits par la longueur totale de la ligne. Enfin, on a déterminé la déclivité générale moyenne du réseau en multipliant la déclivité moyenne de chaque ligne par sa recette brute et divisant la somme des produits par la recette totale de l'ensemble du réseau, ce qui tient compte à la fois de la longueur des lignes et de leur fréquentation.

des dépenses de l'ensemble des réseaux français, ce qui représenterait pour l'exercice 1884, par rapport à 1883, une économie réelle de 7 p. 100. Telle n'est pas la conclusion qui découle du tableau ci-dessus, et la différence provient d'une erreur commise dans la longueur exploitée portée à 6,084, tandis qu'elle était réellement de 6.471 kilomètres; cette erreur a rejailli naturellement sur la fréquentation F. Le tableau ci-dessus montre, en tout cas, que la compagnie P.-L.-M. ne s'est pas arrêtée dans cette voie de réduction de ses dépenses, et que son prix de revient de l'exercice 1886 est inférieur de 5,3 p. 100 à celui de l'exercice 1883.

Nous voudrions borner là nos observations; mais nous retrouvons dans la note que nous examinons, sur le prix de revient, en général, sur le prix de traction, en particulier, du réseau de l'État, comparé avec celui des six grands réseaux, des appréciations déjà formulées par M. l'inspecteur général Ricour dans le remarquable mémoire qu'il a publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (septembre 1885); c'est ici le lieu de les discuter.

D'après le mémoire de 1887, le prix de revient général de l'État, en 1884-1885, serait inférieur de 15 p. 100 à celui des six grands réseaux (p. 170);

Le prix de revient de la traction spécialement y serait inférieur de 30 p. 100 à celui des mêmes réseaux (p. 176).

La question, ajoute-t-il, est loin d'être épuisée; elle vaut la peine, en effet, qu'on s'y arrête quelques instants.

La comparaison des prix de revient de l'unité de trafic sur les divers réseaux, nous ne la tenterons pas; nous avons montré que la formule qui avait servi à les déterminer était incomplète, erronée, par conséquent, puisqu'elle ne tient pas compte de l'élément important des déclivités; et nous n'avons pas, pour le moment, les élé-

ments pour appliquer aux divers réseaux la formule (5) qui, seule, peut servir de base à une pareille comparaison,

Mais, en ce qui concerne la *traction* pour laquelle, au moyen de calculs assez laborieux, le mémoire revendique pour l'État (p. 174-176) un avantage de 30 p. 100, nous n'éprouvons plus le même embarras.

Nous reconnaissons, avec le mémoire de 1887, que la proportion des dépenses de la traction, par rapport à celle des autres services, a représenté :

Sur les six grands réseaux. .	52 p. 100 (en 1882-1883);	50,5 p. 100 (en 1884-1885).
Sur l'État.	46 — —	39 — —

D'un *rapport* de ce genre, il n'y a manifestement aucune conséquence à tirer au point de vue de la comparaison entre un réseau et un autre, ne serait-ce qu'en raison des modes différents de répartition de la dépense totale entre les différents services; il en est tout autrement quand il s'agit d'un réseau déterminé, et nous rendons pleine et entière justice aux résultats fort remarquables obtenus par M. Ricour au réseau d'État et que le simple rapprochement des chiffres ci-dessus 46 et 39 met nettement en évidence. Chacun apprécie à leur valeur les perfectionnements divers apportés par M. Ricour, en 1884-1885, au matériel roulant de l'État, et les économies qu'ils ont permis de réaliser sur les exercices antérieurs (*). Il n'y a qu'à désirer qu'ils se maintiennent en d'autres mains et avec des machines moins neuves, pour les exercices qui suivront 1886.

Cela dit, et ce n'était que justice, nous pouvons examiner plus librement les comparaisons faites par le mé-

(*) Indiquons cependant, à propos de l'économie de graissage, évaluée à 62 p. 100 (p. 181), le rôle important joué par la diminution, très notable depuis quelques années, du *prix* des huiles de graissage.

moire de 1885, entre les frais de traction du réseau de l'État et ceux du réseau P.-L.-M., que M. Ricour veut bien reconnaître comme les plus bas parmi ceux des six grandes compagnies.

Il est évident, et sur ce point nous sommes bien d'accord avec lui, que l'unité de comparaison ne peut être le prix de revient du kilomètre de train, que l'on a trop souvent le tort de considérer seul et qui a l'inconvénient radical de ne tenir aucun compte de la charge du train moyen; il n'y a évidemment qu'une unité de comparaison possible : le prix de la tonne brute transportée à 1 kilomètre.

C'est bien, en effet, la tonne brute kilométrique que le mémoire de 1887 prend comme point de comparaison; mais, par une exception que nous ne comprenons pas, aux errements suivis dans tout le mémoire, qui parle d'unités kilométriques (1 voyageur assimilé à 1 tonne), les calculs de la page 177 ne portent que sur l'unité *voyageurs*, assez difficile à isoler (pour tenir compte des trains mixtes); et c'est de la charge brute remorquée par les *trains de voyageurs* que l'on y déduit une économie de 18 p. 100 en faveur du réseau d'État; les autres 12 p. 100 qui complètent l'avantage total de 30 p. 100 étant attribués par différence (p. 179) à la meilleure utilisation des places offertes.

Il nous paraît plus sûr, dans des calculs comparatifs de ce genre, qui présentent, nous allons le voir, tant de causes d'incertitude, de ne pas essayer de faire de départ entre les trains de *voyageurs* et les trains de *marchandises*, et de rapporter l'ensemble de la dépense à l'ensemble du tonnage kilométrique brut effectif pour en déduire le prix de traction de la tonne kilométrique.

Plaçons-nous donc sur ce terrain pour examiner les appréciations du mémoire de 1885.

Pour tenir compte de ce que, sur le réseau P.-L.-M.,

le charbon coûte plus cher et contient plus de cendres que sur le réseau de l'État, le mémoire calcule quelle serait l'atténuation de dépense au P.-L.-M. si l'on y brûlait le même charbon qu'à l'État et acheté au même prix; il constate que nos prix, ainsi atténués, sont les plus faibles de tous les grands réseaux français; mais il ajoute qu'ils sont encore plus élevés que ceux de l'État, qui sont de 4f,699 par 1.000 tonnes kilométriques.

Il importe tout d'abord de remarquer que les chiffres de l'État se rapportent à 1884, tandis que ceux de P.-L.-M. sont relatifs à 1883. La comparaison des chiffres de 1884 pour les deux réseaux s'établit comme suit :

	ETAT	P.-L.-M.
Dépenses totales.	5.635.174f	56.021.012f
Tonnage kilométrique brut.	1.198.999.826	12.383.813.208
Prix de revient de 1.000 tonnes kilométriques. .	4f,699	4f,524

Mais, pour rendre ces chiffres comparables, il ne suffit pas de rectifier ceux du P.-L,-M. en raison de la seule différence de prix et de qualité des charbons employés; il faut que les dépenses de traction de l'un des deux réseaux comprenne les mêmes éléments que celles des deux réseaux et n'en comprennent pas d'autres, et, en outre, que les tonnages soient évalués de la même manière de part et d'autre. Il s'en faut qu'il en soit ainsi. Sans entrer dans des détails où l'on se perdrait fatalement, nous indiquerons ici les principales rectifications :

1° *Charbon.* — Les charbons brûlés au P.-L.-M., en 1884, contenaient 10 p. 100 de cendres en moyenne et coûtaient 22f,65 la tonne rendue sur le tender; à l'État, ils tenaient 6 p. 100 de cendres et coûtaient 22f,65.

Si les charbons français du P.-L.-M., qui se trouvent revenir précisément au même prix (transport sur le réseau non compris), avaient eu la même teneur en cendres que

les charbons anglais de l'État, la dépense de traction aurait été diminuée de 520.336 francs.

2° *Transports.* — Toutes les matières consommées au P.-L.-M. sont grevées de leurs frais de transport sur le réseau; il n'en est pas de même à l'État; cette différence de procédé représente :

Pour les charbons.	2.117.851 fr.
Pour les matières, outils, métaux, bois, huiles, etc.	1.285.668

3° *Liquidation de matériel.* — Au P.-L.-M., les comptes d'entretien sont grevés, en outre des dépenses d'entretien proprement dites, de toutes les dépenses de liquidation de matériel démoli ou vendu, des dépenses de transformation de matériel qui n'ajoutent rien à sa valeur marchande; elles se sont élevées, en 1884, à 1.567.788 francs.

Sur l'État, il n'y a pas de dépenses de ce genre, pas encore du moins, ce qui tient sans doute à ce que le matériel, étant relativement neuf, n'est pas encore entré dans la période normale de remplacement et de transformation.

4° *Tonnage.* — Le tonnage kilométrique brut est calculé, sur le réseau de l'État, d'après le poids mort *exact* des véhicules; sur le P.-L.-M., d'après des poids *conventionnels* fixés par un ordre de service fort ancien et très notablement inférieurs au poids mort réel. — Pour 1884, le tonnage kilométrique exact est supérieur au tonnage kilométrique accusé, de 1.300.461.655 tonnes kilométriques.

En tenant compte de ces quatre natures de rectifications, le tableau suivant donne la comparaison finale, pour 1884, du prix de revient d'une tonne kilométrique sur les deux réseaux :

	ÉTAT	P.-L.-M.
Dépenses brutes accusées.	5.635.174f	56.021.012f
Différence de prix des charbons. Transports. Liquidation (1°, 2°, 3°).	»	5.491.643
Dépenses à comparer D.	5.635.174f	50.529.369f
Tonnage kilométrique brut accusé	1.198.999.826	12.383.813.208
A ajouter (4°).	»	1.300.461.655
Tonnage kilométrique à comparer T. . .	1.198.999.826	13.684.274.863
Prix de revient comparables pour une tonne. . .	0c,47	0c,37

Nous ne poursuivrons pas pour d'autres exercices cette comparaison entre les deux réseaux. Nous nous contenterons, en terminant, de montrer par le tableau suivant dans quelle mesure ont diminué, depuis 1883, les dépenses de traction du réseau P.-L.-M., à quelque point de vue qu'on les considère :

	1883	1884	1885	1886	9 MOIS DE 1887
Prix du kilomètre de train moyen. . . .	1f,114	1f,028	0f,978	0f,936	0f,899
— de véhicule moyen . .	4c,69	4c,31	4c,17	4c,03	»
Prix de la TONNE kilométrique brute. . .	0 ,484	0c,452	0 ,437	0 ,424	0c,405
— — utile . . .	1 ,179	1c,157	1c,122	1 ,077	»

CONCLUSION.

Si l'on veut se faire une idée approchée de ce que peut être la dépense d'exploitation d'une ligne analogue à celles qui composent le réseau français actuel et exploitée dans les mêmes conditions, dont le profil est indéterminé encore et dont le produit est connu ou supposé, l'on peut se servir de la formule :

(2) $D = 6000^f\,L + 0{,}40\,R$ (dépense et recette totales),

ou

$d = 6000^f + 0{,}40\,r$ (dépense et recette kilométriques).

Si, dans les mêmes conditions, l'on veut se faire une idée de ce que peut être le prix de revient de la tonne à 1 kilomètre, ou, plus généralement, d'une unité kilométrique (en assimilant 1 voyageur à 1 tonne, etc., comme on le fait ordinairement sans grande erreur), on peut se servir de l'expression :

$$(4) \qquad p = 2^{c},2 + \frac{600\,000}{F},$$

qui dérive de la précédente, en fonction de la fréquentation de la ligne, c'est-à-dire de son trafic connu ou supposé.

Mais si l'on veut :

Savoir ce que doit être ce prix de revient sur une ligne ou un réseau de profil connu ;

Apprécier les résultats d'une ligne ou d'un réseau donné ;

Comparer entre eux les résultats de deux lignes ou de deux réseaux de profil et de trafic connus ;

Il faut se servir de la formule :

$$(5) \qquad p = \left(1^{c},5 + \frac{300\,000}{F}\right)(1 + 0,05\,i).$$

Dans ces formules :

La longueur.	L	est exprimée	en kilomètres,
La recette et la dépense. . . .	R, r, D, d	—	en francs,
Le prix de revient d'une unité kilométr.	p	—	en centimes,
La déclivité	i	—	en millimètres par mètre,
L'importance du mouvement	T	—	en tonnes ou unités kilométr.
La fréquentation	$F = \frac{T}{L}$		

Nous nous abstenons d'essayer de tirer actuellement une conclusion de ces formules ; il sera aisé de le faire à qui connaîtra exactement les éléments, la déclivité moyenne, en particulier, d'une ou plusieurs lignes en réseaux déterminés.

Cette même formule (5) donne la solution rationnelle d'un problème qui se pose à chaque instant et qu'on résout ordinairement — suivant les circonstances et les intérêts plus encore que suivant la raison, — nous voulons parler de la direction à donner au transport des marchandises.

Les voyageurs déterminent leur itinéraire suivant leurs convenances.

Les expéditeurs de marchandises demandent l'application des taxes les plus réduites, quel que soit d'ailleurs l'itinéraire effectivement suivi.

Il serait rationnel que les taxes les plus réduites s'établissent toujours par l'itinéraire qui correspond, pour les compagnies, au minimum de dépenses. Ce ne sera pas, à coup sûr, la plus courte distance géographique; ce sera la plus courte distance rationnelle, « *reasonable* » suivant l'expression, si juste dans son vague même, que l'on retrouve à chaque pas dans les cahiers des charges anglais.

Pour apprécier rationnellement les conditions qui influent sur le prix de revient, il ne faut pas seulement tenir compte des *déclivités*, il convient aussi d'avoir égard aux circonstances qui, au grand dommage de l'économie, interrompent la circulation directe des trains de marchandises, c'est-à-dire des *transmissions dans les gares de jonction* d'une ligne avec une autre.

Ces *transmissions* exigent des manœuvres, des remaniements de trains et sont l'équivalent d'un parcours supplémentaire dont il faut tenir compte. On a cru devoir en fixer le chiffre à 25 kilomètres dans les conventions intervenues en 1883, entre l'administration des chemins de fer de l'État et les Compagnies de l'Ouest et d'Orléans.

Quant aux *déclivités*, il faut en tenir compte par des distances d'application, en admettant, d'après le mémoire

précité de M. Amiot, que 1 kilomètre de ligne sera compté pour :

1.000 mètres	si la déclivité	est de	0 à 5	millimètres	par mètre.
1.200	—	—	5 à 10	—	—
1.400	—	—	10 à 15	—	—
1.600	—	—	15 à 20	—	—
1.800	—	—	20 à 25	—	—
2.000	—	—	25 à 30	—	—
2.200	—	—	> 30	—	—

Avec ces deux conditions, ce qu'on appelle le *principe de la plus courte distance* peut devenir une *loi* générale, dont l'application donnera une solution rationnelle des questions suivantes :

1° Détermination de l'itinéraire à faire suivre aux marchandises dans l'intérieur d'un réseau (*) ;

2° Répartition du trafic entre deux ou plusieurs compagnies et règlement des tarifs communs qui doivent l'assurer.

Novembre 1887.

(*) Intéressante pour les compagnies, cette question ne l'est pas moins pour l'État dans les deux cas suivants par exemple :

A. La Compagnie P.-L.-M. exploite la ligne du Rhône au Mont-Cenis pour le compte de l'État. Quel est le trafic de transit auquel peut rationnellement prétendre la section de Culoz à Montmélian ?

B. Pour les lignes mises à double voie sur son ordre, l'État, aux termes des conventions de 1878, supporte la charge du capital correspondant jusqu'à ce que la ligne produise 35.000 francs par kilomètre. Quel est le trafic auquel ces lignes peuvent prétendre ?

N° 70

NOTE

SUR LES

FORMULES DE RÉSISTANCE DU FER ET DE L'ACIER

EMPLOYÉES EN ALLEMAGNE

ET

SUR L'APPLICATION AUX PONTS MÉTALLIQUES

DES RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES DE WÖHLER ET SPANGENBERG

Par M. BRICKA, ingénieur en chef des ponts et chaussées.

L'attention des ingénieurs a été appelée depuis quelque temps en France sur les expériences de Wöhler et de Spangenberg relatives aux modifications que subit la résistance dès métaux lorsqu'ils sont soumis à des efforts répétés un grand nombre de fois. M. Considère a analysé ces expériences dans son mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions (*Annales*, avril 1885); M. Séjourné, ingénieur des Ponts et Chaussées, en a fait l'objet d'une note autographiée qui est connue d'un grand nombre de nos camarades; M. Flamant les a rappelées dans son rapport de mission sur la résistance de l'acier (*Annales*, mai 1886); M. Mayer a publié récemment (*Annales*, décembre 1886) un résumé fort intéressant des derniers travaux de Bauschinger, continuateur de Wöhler et de Spangenberg; enfin, nous avons eu occasion, dans un mémoire sur les ponts métalliques à l'étranger (*Annales*, mars 1887), de citer les formules de Launhardt et de Wey-

rauch (*) qui sont déduites des lois de Wöhler et dont l'emploi est aujourd'hui général en Allemagne.

Les formules de Launhardt et de Weyrauch ont fait, il y a quelques années, à la Société des Ingénieurs civils (séances des 1er et 15 juillet 1881), l'objet d'une discussion fort intéressante à laquelle ont pris part notamment MM. Tresca, Seyrig, Marché, Brüll et de Comberousse. On a fait ressortir, dans cette discussion, combien les expériences de Wöhler et de Spangenberg, dans lesquelles la répétition des efforts avait lieu à des intervalles extrêmement rapprochés, s'écartent des conditions réalisées dans la pratique en ce qui concerne les différentes pièces des constructions en fer (**); on a fait observer que, au moins lorsque les efforts sont de même sens, leur répétition indéfinie est, d'après ces expériences même, sans danger tant que la limite d'élasticité n'est pas atteinte; les ingénieurs qui ont pris part à la discussion ont d'ailleurs été à peu près unanimes pour repousser le principe qui a servi de base aux formules de Launhardt et de Weyrauch et qui fait reposer les coefficients de résistance sur la considération de la limite de charge de rupture.

La discussion des expériences de Bauschinger démontre

(*) Formule de Launhardt :

$$\left.\begin{array}{l}\text{(Pour le fer) } R = 800\left(1 + \frac{1}{2}\frac{s \text{ mini}}{s \text{ maxi}}\right) \\ \text{(Pour l'acier) } R = 1.200\left(1 + \frac{9}{5}\frac{s \text{ mini}}{s \text{ maxi}}\right)\end{array}\right\}$$ Pour les pièces dans lesquelles l'effort est toujours de même sens.

Formule de Weyrauch :

$$\left.\begin{array}{l}\text{(Pour le fer) } R = 700\left(1 - \frac{1}{2}\frac{s \text{ mini}}{s \text{ maxi}}\right) \\ \text{(Pour l'acier) } R = 1.100\left(1 - \frac{5}{11}\frac{s \text{ mini}}{s \text{ maxi}}\right)\end{array}\right\}$$ Pour les pièces dans lesquelles le sens de l'effort varie.

s mini et *s* maxi désignant en valeur absolue le plus petit et le plus grand des efforts auxquels les pièces calculées peuvent être soumises.

(**) Il ne faut pas oublier que les expériences de Wöhler et de Spangenberg ont été faites en vue d'étudier le mode de travail du métal dans les essieux de wagons et non dans les poutres.

d'une manière incontestable la justesse des observations faites à la Société des Ingénieurs civils. Ces expériences ont prouvé en effet, notamment que la durée de l'intervalle de temps entre l'application successive des charges ne saurait être négligée (*), et qu'une pièce peut être soumise à des efforts plusieurs millions de fois répétés sans que ni sa structure ni sa résistance à des charges statiques subissent de modifications (**). Les résultats trouvés par cet expérimentateur, en ce qui concerne les variations que subit, dans certaines conditions, la limite d'élasticité, ne peuvent d'ailleurs que confirmer la justesse du principe admis par les constructeurs français, qui considèrent que la stabilité d'une construction n'est plns assurée lorsque cette limite est dépassée.

Pour reconnaître combien est hasardée l'application des lois de Wöhler aux constructions métalliques, il n'était pas besoin, à notre avis, d'attendre des expériences faites, comme celle de Bauschinger, avec des lectures de deux millièmes de millimètre. Les variations que subit la limite d'élasticité sous des charges qui atteignent la valeur primitive de cette limite étaient connues depuis longtemps, en France, par des expériences fort simples de Tresca. Quant à l'invariabilité de la structure et de la résistance à la rupture du fer et de l'acier, soumis à des efforts tels que ceux qu'ils supportent dans les ponts métalliques, il est facile de la constater sur les rails des voies de chemins de fer. Ces rails sont, au point de vue de l'influence de la variation des charges, placés dans les conditions les plus défavorables ; leur poids propre, dans l'intervalle compris entre deux appuis consécutifs, est absolument négligeable par rapport aux charges variables qui dépassent toujours une tonne pour les roues de wagons et qui atteignent jusqu'à sept tonnes pour les

(*) Mémoire de M. Mayer (p. 733).
(**) Mémoire de M. Mayer (p. 743).

roues de machines; les rails reçoivent ces charges brusquement, sans l'interposition d'aucune matière élastique; enfin, le métal est soumis alternativement à des efforts de tension et de compression selon la position des roues. D'un autre côté, ces efforts atteignent des limites très élevées sous le passage des machines. Dans la voie de la compagnie d'Orléans et des chemins de fer de l'Etat, une des plus robustes qui existent en France, la tension et la compression par millimètre carré, en admettant que toutes les traverses soient uniformément bourrées, ne sont pas inférieures à 8k,500 lorsque le rail n'a subi aucune usure (*); elles s'élèvent à 13 kilogrammes, lorsque les deux champignons ont subi chacun une usure de un centimètre; or, il arrive fréquemment que des traverses mal bourrées cèdent sous le passage des roues et la dénivellation qui se produit ainsi au droit de l'un des appuis augmente dans une proportion considérable le travail du métal. Dans ces conditions, si l'on tient compte des causes nombreuses d'affaiblissement que subissent les rails jusqu'au moment où leur remplacement devient nécessaire (diminution de la section du métal par suite de l'usure, jeu dans les coussinets, affaiblissement de l'éclissage, amoindrissement de la quantité et de la qualité du ballast), on peut s'étonner que le nombre des ruptures ne soit pas plus grand, et on peut affirmer qu'il serait bien autrement considérable si les variations des efforts auxquels le métal est soumis produisaient dans sa constitution une altération sensible.

Il serait facile de s'assurer de l'inaltérabilité des rails au moyen d'épreuves faites sur des rails d'acier arrivés

(*) Ce calcul est fait en admettant la pose sur six traverses pour longueur de 5m,50 ou douze traverses par longueur de 11 mètres; la compagnie d'Orléans augmente sur ses lignes les plus chargées le nombre des traverses d'un sixième, mais cette modification est faite en vue d'augmenter l'assiette de la voie bien plutôt que de diminuer la fatigue des rails.

à usure complète sur les lignes à grande circulation ; on peut admettre qu'au moment où ils sont mis au rebut ils n'ont pas subi le passage de moins de 200.000.000 tonnes, ce qui, en admettant une charge moyenne de cinq tonnes par essieu, correspond à 40 millions de répétitions de cette charge. Nous n'avons pas à notre disposition de rails dans ces conditions, mais nous avons pu, grâce à l'obligeance de M. Planche, directeur des forges de Saint-Nazaire, faire essayer quelques morceaux de rails en fer qui avaient séjourné pendant vingt ans dans les voies principales de la ligne de Saintes à Angoulême, de Nantes à La Roche-sur-Yon par Clisson et de Niort à La Possonnière, et avaient supporté le passage d'environ 1.200.000 essieux. Ces essais ont donné, sur quatre échantillons, des résistances à la traction de 31, 35, 37 et 39 kilogrammes par millimètre carré et des limites d'élasticité dépassant $22^{k},5$. On voit qu'au bout de vingt ans et après le passage d'un nombre d'essieux dépassant 1.200.000, le fer des rails exposés à des efforts qui dépassent très fréquemment 8 kilogrammes par centimètre carré est encore, au point de vue de la résistance, équivalent à du métal de première qualité. On peut certainement en conclure que, dans les ouvrages d'art où l'action des surcharges accidentelles s'exerce dans des conditions infiniment plus favorables, elle ne produit, même après un nombre très considérable de répétitions, aucun effet nuisible appréciable.

L'extension aux ponts métalliques des résultats des expériences de Wöhler et de Spangenberg est donc, à notre avis, condamnée aussi bien par les résultats des expériences de Bauschinger que par l'observation des faits ; il n'en résulte pas néanmoins qu'on doive rejeter purement et simplement les formules auxquelles ces expériences ont servi de base. Si on l'envisage seulement au point de vue des coefficients de travail auquels elle conduit dans les

divers cas, la formule de Launhardt (*) ne fait que traduire la règle aujourd'hui admise en France, en vertu de laquelle la limite du travail du métal est d'autant moins élevée que les surcharges accidentelles sont relativement plus fortes; or, cette règle est évidemment justifiée aussi bien par les effets dynamiques que peuvent produire ces surcharges que par l'impossibilité d'en déterminer exactement la valeur maximum, surtout lorsqu'il s'agit d'ouvrages destinés à une longue durée. Quant à la formule de Weyrauch, qui conduit à réduire dans une très forte proportion le coefficient maximum du travail lorsque les pièces sont exposées à des renversements d'efforts, elle nous paraît, même après les expériences de Bauschinger, ne reposer que sur des données tout à fait insuffisantes et on est en droit de conclure, par la manière dont se comportent les rails, qu'elle conduit, en tout cas, à des coefficients réduits bien au delà des limites que commande la prudence.

Quelque opinion que l'on ait au sujet de la valeur des formules dont nous venons de parler, il est, dans tous les cas, un élément qu'on ne saurait y faire entrer et qui ne peut être négligé dans l'étude des ponts métalliques : c'est la constitution même des poutres que l'on a à calculer. Les hypothèses que l'on fait au sujet de la répartition des efforts dans les pièces sont le plus souvent assez éloignées de la vérité pour que les coefficients de travail du métal à adopter dans les calculs ne puissent être déterminés en toute sécurité sans tenir compte de cette constitution.

Paris, le 20 juillet 1887.

(*) Nous ne parlons pas ici de la formule de M. Séjourné, qui nous paraît préférable à celle de Launhardt, la discussion des formules elles-mêmes ne rentrant pas dans le cadre de cette note.

N° 71

ETUDE

SUR

LES PORTES D'ÉCLUSES EN TOLE

Par M. GALLIOT, Ingénieur des ponts et chaussées.

OBJET DE CETTE ÉTUDE.

Ayant eu à construire des portes d'écluses en tôle, j'ai remarqué que les moyens de calcul employés étaient fort discutés et paraissaient, en effet, manquer un peu de bases; j'ai été conduit ainsi à étudier les portes de mon service, tant au canal de la Marne à la Saône qu'à celui de Bourgogne, à les essayer sous diverses charges, à mesurer leurs déformations et à chercher s'il ne serait pas possible de calculer à l'avance, et, avec une approximation suffisante, le travail auquel est soumise chaque partie.

La présente étude n'est que le résumé sommaire de ces recherches; elle contient quelques résultats des études expérimentales et la reproduction de quelques-uns des calculs auxquels on est conduit dans ce genre de recherches. Je l'ai divisée en quatre chapitres relatifs: l'un au bordage des portes, l'autre à la carcasse ou ossature de la porte, formée des entretoises et des montants; les

deux autres contiennent : l'un, une application des calculs, et l'autre, un résumé général.

Chacun des deux premiers chapitres se subdivisera en trois parties : les essais expérimentaux, les tentatives de calculs et la comparaison entre les résultats trouvés pour chacun de ces deux moyens.

CHAPITRE I.

ÉTUDES DES BORDAGES.

§ I. — *Expériences sur les bordages.*

Les essais qui vont suivre, sont extraits d'une série faite sur des portes de construction variable; les tôles de bordage proviennent d'usines très diverses et répandues sur toute la surface de la France et doivent, certainement, avoir des coefficients d'élasticité assez variables.

De plus, certains de ces essais ont été faits sur des portes absolument neuves, mises en place depuis quelques jours ou quelques mois seulement; les autres, sur des portes en service depuis plusieurs années.

Enfin, les moyens employés pour les essais ont été fort variables. Ils ont consisté, pour certains, en une simple règle appuyée sur les deux côtés des panneaux et dont on mesurait l'écartement du milieu à la tôle, tandis que, pour d'autres, on a employé un appareil amplifiant dix fois les flèches, et, pour certains encore, un autre appareil qui les mulipliait par 90.

Ces conditions variables ont dû introduire des différences dans les résultats trouvés; la nature des fers notamment doit avoir une influence assez considérable. Mais la principale influence vient de la construction et du temps de service des portes.

Ainsi, on remarque, dès les premiers essais qu'on fait,

que deux panneaux, identiques comme dimensions et nature de fer, et mis en service depuis le même temps et qu'on essaie sous la même charge d'eau, soit par exemple, deux panneaux voisins d'une même porte, prennent des flèches fort différentes. En les examinant de plus près, on trouve vite la cause de ce fait; l'un, par exemple, est bien plan et bien tendu lorsqu'il n'y a pas de charge, tandis que l'autre est bombé soit dans un sens, soit dans l'autre; ou bien encore, l'un est rivé très serré tandis que l'autre n'est pas pressé par sa rivure contre les pièces qui lui servent de cadre.

Le temps de service a aussi beaucoup d'influence sur la flèche prise sous la charge et il semble que les panneaux s'accommodent peu à peu à la charge, et que tel, qui fléchissait beaucoup dans le principe, acquiert, au bout de quelque temps de service, la propriété de fléchir moins.

Du reste, les tableaux ci-après donnent une idée du peu de constance des résultats trouvés.

Les notations de ces tableaux sont les suivantes :

α désigne la longueur horizontale et β la hauteur verticale du panneau; e désigne l'épaisseur en millimètres de la tôle de bordage; H est la hauteur de l'eau au-dessus du centre du panneau; F est la flèche constatée en expérience.

Il faut aussi noter que les portes du canal de la Marne à la Saône sont à entretoises équidistantes; celles du canal de la Haute-Marne et celles du canal de Bourgogne ont des entretoises espacées d'une façon inversement proportionnelle à la pression de l'eau.

Voici un tableau d'essais :

TYPES DES PORTES	$\frac{\alpha}{\beta}$	e	H	F	OBSERVATIONS
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	$\frac{1,336}{1,260}$	5	0,38 0,88 1,38 1,88	4,9 9,2 11,0 13,1	Vantaux neufs essayés après un ou deux mois de service seulement. — Fers de bordages reconnus comme très extensibles au moment de la construction : les essais à traction avaient donné des allongements atteignant à la rupture jusqu'à 20 p. 100.
Idem.	$\frac{1,336}{1,260}$	5	0,38 0,88 1,38 1,88	4,9 9,7 12,0 14,5	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	$\frac{1,321}{1,023}$	6	0,59 1,14 1,74 2,29 2,74 3,44 3,84	3,5 7,8 9,8 12,1 13,7 15,2 15,4	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	$\frac{1,336}{1,010}$	5	0,40 1,47	2,14 10,27	Vantaux en service depuis un certain temps.
Idem.	$\frac{1,336}{1,010}$	5	0,40 1,47	0,55 7,39	
Canal de la Haute-Marne. Vantail amont.	$\frac{0,857}{0,640}$	4	1,79	6,83	Vantail en service depuis longtemps.
	$\frac{0,857}{1,39}$	4	0,75	4,08	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	$\frac{1,321}{1,023}$	6 7	0,10 1,37 2,54 3,71	0,37 4,29 6,04 11,10	
Idem.	$\frac{1,321}{1,023}$	6 7	0,39 1,54 2,69 3,84	0,27 6,71 11,52 10,19	Ces deux vantaux sont construits d'une façon absolument identiques et avec les mêmes fers.
Idem.	$\frac{1,321}{1,023}$	6	0,39 1,54 2,69	1,22 7,62 9,48	
	$\frac{1,321}{1,023}$	7	3,84	11,09	
Canal de la Haute-Marne. Vantail aval.	$\frac{0,817}{1,065}$	4	0,61	3,09	A partir du troisième panneau, un des côtés du cadre est formé par un petit fer T qui fléchit beaucoup et doit fausser les résultats. Ce T fléchit de 1 millimètre environ et peut fausser les résultats d'autant.
	$\frac{0,817}{0,900}$		1,74	7,25	
	$\frac{0,817}{0,350}$		2,52	1,40	
	$\frac{0,817}{0,350}$		3,02	2,37	
	$\frac{0,817}{0,300}$		3,49	1,14	
	$\frac{0,817}{0,300}$		3,94	1,65	
	$\frac{0,817}{0,250}$		4,36	1,52	
	$\frac{0,817}{0,250}$		4,76	1,51	

TYPES DES PORTES	$\frac{\alpha}{\beta}$	e	H	F	OBSERVATIONS
Canal de Bourgogne.	$\frac{1,35}{1,40}$	7	0,75	2,05	
Vantail aval.	$\frac{1,35}{0,80}$	7	1,95	1,66	Essais faits sur les panneaux de deux vantaux d'une même écluse.
Idem.	$\frac{1,35}{1,40}$	7	0,75	1,25	
	$\frac{1,35}{0,80}$	7	1,95	1,95	

Ce qu'on remarque tout d'abord à l'examen des tableaux ci-dessus, ce sont les différences énormes de flèches que peuvent présenter deux panneaux absolument identiques pressés dans des conditions semblables, différences qui peuvent, surtout pour les petites charges, faire varier les flèches du simple au triple ou au quadruple. Elles sont vraisemblablement dues, ainsi que je l'ai dit déjà, à des différences de construction et surtout au plus ou moins de tension, ou, au contraire, de relâchement existant dans les tôles à leur état naturel avant la charge.

Dans plusieurs essais, d'ailleurs, cet état de non extension primitive des bordages s'est présenté d'une façon absolument visible; la flèche a varié tout à coup brusquement pendant qu'on faisait croître la charge. Pour certains panneaux même, la courbure du bordage non chargé atteignait plusieurs millimètres et était fort sensible à la règle.

Une remarque plus importante et qu'on fait aussi presque de suite quand on étudie les tableaux d'essais, c'est que la flèche ne varie pas proportionnellement à la charge ; cela ressort d'une façon très évidente de tous les essais et surtout de ceux où on a pris la flèche sous des charges croissant d'une façon régulière ; la repré-

sentation graphique des résultats d'essais affecte une forme parabolique très caractérisée.

Les formules basées sur un calcul de résistance à la flexion en supposant que le bordage se comporte comme une poutre reposée ou encastrée aux extrémités ne peuvent donc pas convenir puisque toutes donnent des flèches proportionnelles à la pression.

De même, si l'on calcule le bordage d'après les méthodes connues pour le cas d'une plaque rectangulaire posée sur ses bords, on arrivera encore à une flèche proportionnelle à la pression. Et, si l'on savait résoudre le problème des plaques rectangulaires encastrées, on n'aurait pas non plus une formule applicable au cas qui nous occupe.

Quelques ingénieurs, remarquant que l'épaisseur des bordages n'est jamais qu'une très faible fraction de leur portée $\left(\frac{1}{150} \text{ à } \frac{1}{300}\right)$, ont pensé que les tôles résistaient à peu près uniquement par leur difficulté à s'étendre, et ont, en partant de cette base, construit et employé une formule qui donne des flèches proportionnelles à la racine troisième $(\sqrt[3]{\ })$ de la pression.

L'essai d'application de cette formule aux expériences ne réussit pas du tout : il donne de trop grandes flèches pour les petites charges et, au contraire, de beaucoup trop petites pour les fortes charges.

§ II. — *Essai d'un calcul approximatif.*

La question à résoudre est celle-ci :

Chercher l'état élastique d'une plaque rectangulaire encastrée sur son pourtour et qui fléchit assez pour que des extensions se produisent dans son feuillet moyen.

Ce problème n'a, je crois, jamais été étudié dans les conditions que j'indique, c'est-à-dire en tenant compte

des extensions qui se produisent dans le feuillet moyen par suite de la forme courbe prise par la plaque fléchie; on n'en a cherché la solution que dans la supposition d'une flexion très petite et, par suite, d'une extension négligeable du feuillet moyen et jusqu'à maintenant le problème est resté insoluble.

Je ne reproduirai donc aucun essai dans ce sens et me bornerai à exposer une solution approximative.

Soient :

α la largeur horizontale du panneau;
β la hauteur verticale du panneau;
e son épaisseur;
E le coefficient d'élasticité;
p la charge sur le centre (qui d'ailleurs sera supposée constante sur tout le panneau);
f désignera la flèche centrale.

Considérons un petit élément rectangulaire ($dx\,dy$) du panneau; il est poussé par la pression $p\,dx\,dy$ et soutenu par les forces exercées sur ses quatre côtés.

Ces forces sont de deux genres :

1° Les efforts tranchants dus à la flexion de la tôle;

2° Les composantes, normales au bordage, des tensions générales.

L'équation d'équilibre exprime donc l'égalité entre la pression $p\,dx\,dy$ de la somme des efforts tranchants tout autour de l'élément de la plaque et des composantes normales des tensions parallèles au feuillet moyen.

A la condition de se contenter d'une approximation, il est vrai, assez grossière, mais que, cependant, la suite de cette note montrera être suffisante dans la plupart des cas, on peut obtenir facilement et très rapidement cette équation en opérant de la manière suivante :

Je considère l'élément placé au milieu même de la plaque et pour lequel, par conséquent, la flexion est f. Par cet élément, je fais deux sections parallèlement aux côtés

du cadre et j'ai, d'après les formules connues des poutres encastrées :

$$f = \frac{p\alpha^4}{24 \times 16\,\mathrm{EI}}, \quad \text{et} \quad f = \frac{p\beta^4}{24 \times 16\,\mathrm{EI}},$$

où I est le moment d'inertie $\left(\frac{1}{12}e^3\right)$ de la tôle.

Les efforts tranchants sont donc pour les côtés parallèles aux x :

$$p = \frac{32\,\mathrm{E}e^3}{\alpha^4}f,$$

et, pour les côtés parallèles aux y :

$$p = \frac{32\,\mathrm{E}e^3}{\beta^4}f.$$

La somme cherchée des efforts tranchants est donc :

$$p = 32\,\mathrm{E}e^3 f\left(\frac{1}{\alpha^4} + \frac{1}{\beta^4}\right).$$

Il reste à trouver la somme des composantes normales des tensions. La flèche étant f on a, en supposant que la courbure reste à peu près constante partout, ce qui conduit à supposer la résistance de la plaque un peu supérieure à sa valeur réelle, supposition présentant peu d'inconvénients, on a, dis-je :

$$\rho = \frac{\alpha^2}{8f}, \quad \text{et} \quad \rho' = \frac{\beta^2}{8f}.$$

Les allongements totaux parallèlement aux côtés α et aux côtés β seront :

$$\Delta = \frac{\alpha^3}{24\rho^2}, \quad \text{et} \quad \Delta_1 = \frac{\beta^3}{24\rho'^2}:$$

ρ et ρ' étant les rayons de courbure, et les allongements proportionnels :

$$\delta = \frac{\alpha^2}{24\rho^2} = \frac{8f^2}{3\alpha^2}, \quad \text{et} \quad \delta_1 = \frac{\beta}{24\rho'^2} = \frac{8f^2}{3\beta^2},$$

et les tensions correspondantes seront :

$$T_\alpha = \frac{8Ee}{3\alpha^2}f^2, \quad \text{et} \quad T_\beta = \frac{8Ee}{3\beta^2}f^2.$$

Les composantes normales de ces tensions seront d'ailleurs $\frac{T_\alpha}{\rho_\alpha}$ et $\frac{T_\beta}{\rho_\beta}$, de telle sorte que, pour la somme de ces composantes, on trouvera

$$\varpi = \frac{64Ee}{3}f^3\left(\frac{1}{\alpha^4} + \frac{1}{\beta^4}\right).$$

La somme des réactions opposées à la pression de l'eau et qui lui fait équilibre, sera donc $P + \varpi$.

Telle est la relation entre la pression de l'eau et la flèche prise par le bordage.

On pourrait être tenté d'y faire une légère correction; on sait, en effet, qu'une plaque tirée suivant deux directions rectangulaires s'allonge moins dans chaque sens que si elle était tirée dans une seule direction et que les relations entre les allongements et les tensions sont, dans ce cas, λ étant le coefficient de Poisson,

$$T_\alpha = \lambda e(3\delta_\alpha + \delta_\beta),$$

et

$$T_\beta = \lambda e(\delta_\alpha + 3\delta_\beta).$$

En faisant cette correction, on arriverait à trouver .

$$\varpi = \frac{64Ee}{3}f^3\,\frac{2}{5}\left(\frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2b^2} + \frac{3}{b^4}\right).$$

Mais cette correction serait sans objet. On arriverait ainsi à trouver une résistance ϖ supérieure à celle de la première expression; or, celle-ci est déjà certainement trop forte puisqu'elle correspond au point de la plaque qui résiste le plus; la suite montrera qu'en effet, on obtient de meilleurs résultats en corrigeant au contraire l'exagération due à la considération du point le plus chargé et en introduisant dans la formule, la tension moyenne au lieu de la tension maxima.

D'ailleurs, on compliquerait ainsi inutilement, sous

prétexte de plus grande exactitude, une formule qui, par sa construction même, ne doit pas viser à plus que de représenter une approximation assez éloignée de la réalité.

Il en serait absolument de même d'une formule dans laquelle on essayerait d'introduire l'expression exacte de la résistance d'une plaque à la flexion.

Il faut donc se contenter de l'expression

$$(1) \qquad p = 32\mathrm{E}ef\left(\frac{1}{\alpha^4} + \frac{1}{\beta^4}\right)\left(e^2 + \frac{2}{3}f^2\right).$$

pour représenter la relation qui unit la pression de l'eau avec la flèche, l'épaisseur et les dimensions de la plaque de bordage.

Quant à la tension parallèlement à un des côtés du cadre, on l'obtiendra en ajoutant à la tension générale la tension à la surface, due à la flexion.

L'allongement général est, comme on a vu déjà :

$$\delta_\alpha = \frac{8f^2}{3\alpha^2}, \quad \text{et} \quad \delta_\beta = \frac{8f^2}{3\beta^2}.$$

Quant à l'extension due à la flexion, on la trouve en remarquant que, à une longueur de feuillet moyen $\rho\varepsilon = 1$ correspond une longueur sur la surface convexe $\left(\rho + \frac{e}{2}\right)\varepsilon$, d'où un allongement $\frac{e\varepsilon}{2}$, soit $\frac{e}{2\rho}$ ou encore $\frac{8ef}{2\alpha^2}$.

L'allongement proportionnel total au point le plus tendu est donc :

$$\Delta = \frac{4f}{\alpha^2}\left(\frac{2}{3}f + e\right) \quad \text{ou} \quad \Delta_1 = \frac{4f}{\beta^2}\left(\frac{2}{3}f + e\right),$$

suivant qu'on le considère dans le sens des α ou dans celui des β.

Les tensions par mètre carré s'obtiendront en multipliant ces allongements par le coefficient d'élasticité et on aura :

$$(2) \quad \mathrm{T}_\alpha = \frac{4\mathrm{E}f}{\alpha^2}\left(\frac{2}{3}f + e\right), \quad \text{et} \quad \mathrm{T}_\beta = \frac{4\mathrm{E}f}{\beta^2}\left(\frac{2}{3}f + e\right).$$

Telles sont les formules dont il s'agit maintenant de vérifier l'exactitude en comparant leurs résultats avec ceux de l'expérience.

§ III. — *Comparaison du calcul avec l'expérience.*

La comparaison des expériences avec les résultats du calcul se fait très rapidement, en ayant soin de résoudre d'abord, et de représenter par un graphique l'équation (1) ci-dessus.

On remarque, en effet, qu'elle peut s'écrire :

$$\frac{p}{\frac{1}{\alpha^4}+\frac{1}{\beta^4}} = 32\mathrm{E}\left(e^3 f + \frac{2}{3} ef\right),$$

dont le second membre peut être calculé une fois pour toutes, pour les valeurs de e et de f. On n'aura alors qu'à chercher dans la table ainsi formée ou sur le graphique la représentant, pour avoir l'une des trois quantités p, e ou f, les deux autres étant connues.

Le graphique représentant toutes les valeurs que prend $e^3 f + \frac{2}{3} ef^3$ lorsque e et f varient de 0 à 15, n'a pas été joint à la présente note qui ne contient que celui correspondant à la formule corrigée.

On peut d'ailleurs s'en passer facilement; les équations de la forme : $ax^3 + bx = e$, se résolvant très vite.

J'ai ainsi formé le tableau suivant de comparaison entre les résultats des expériences et ceux du calcul.

Ce tableau reproduit celui déjà donné des essais et les donne dans le même ordre, sauf que les résultats obtenus sur des panneaux identiques et sous la même charge, y sont rapprochés.

Pour avoir les dimensions des panneaux et leur épaisseur, on devra se reporter au tableau des essais.

TYPES DES PORTES	CHARGE	FLÈCHE Expériences	FLÈCHE Calcul	OBSERVATIONS
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	0,38	4,9 4,9	4,5	
	0,88	9,2 9,7	6,8	
	1,38	11,0 12,0	8,5	
	1,88	13,1 14,5	9,8	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	0,59	3,5	3,0	
	1,14	7,8	4,8	
	1,74	9,8	6,3	
	2,29	12,1	7,2	
Idem.	2,74	13,7	7,9	
	3,44	15,2	8,7	
	3,84	15,4	9,3	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	0,40	2,14 0,55	4,8	
	1,47	10,27 7,39	8,7	
Canal de la Haute-Marne. Vantail amont.	1,79	6,83	6,5	
	0,75	4,08	2,0	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	0,10	0,37	0,5	
	1,37	4,29	5,3	
	2,54	6,04	7,5	
	3,71	11,10	8,8	
Idem.	0,39	0,27 1,22	2,3	
	1,54	6,71 7,62	5,7	
	2,69	11,52 9,48	7,8	
	3,84	10,19 11,09	7,9	
Canal de la Haute-Marne. Vantail aval.	0,61	3,09	3,5	
	1,74	7,25	5,8	
Idem	2,52	1,40	1,0	
	3,02	2,37	1,2	
	3,49	1,14	0,45	
	3,94	1,65	0,5	
	4,36	1,52	0,45	
	4,76	1,51	0,45	
Canal de Bourgogne. Vantail aval.	0,75	2,05 1,25	0,9	La table donne pour des tôles de 6 des flèches de 1, 3 et 3^{mm},5.
	1,95	1,66 1,95	2,9	

On voit par le tableau qui précède que la formule employée donne généralement des flèches très acceptables pour de petites charges, mais aussi qu'elle en donne régulièrement de trop petites pour les grandes charges. Cela peut tenir dans une certaine mesure, à ce que, sous de fortes charges, la tôle de bordage glisse un peu sur ses appuis et que de plus, son coefficient d'élasticité diminue ; mais je pense que la principale cause d'erreur vient de la façon même dont j'ai construit la formule. Le terme dû à l'extension générale a, en effet, été calculé sur l'élément le plus tendu et non en mettant en compte la tension moyenne.

Or, il est bien évident que l'élément du milieu supporte des extensions plus grandes que tout autre et que, de plus, l'inclinaison de ses bords sur la normale ou autrement dit sa courbure, est également plus forte que partout ailleurs. De là, un excès d'influence accordé aux effets de tension générale.

On peut apprécier approximativement l'erreur ainsi commise en recherchant comment varie la composante normale de la tension, supposée constante, dans une feuille fléchie suivant la forme d'une poutre encastrée ou suivant une forme sinusoïdale : deux formes qui diffèrent très peu de celle réalisée en pratique.

En partant de ces suppositions et considérant successivement la plaque de bordage comme engendrée par une courbe de flexion analogue à celle de la poutre encastrée ou par une courbe sinusoïdale, prenant la somme des composantes normales N de la tension calculée comme plus haut et intégrant sur toute la surface $\int_0^\alpha \int_0^\beta N dx dy$ et divisant par $\alpha\beta$, j'ai trouvé que la moyenne n'était que les $\frac{4}{9}$ ou les $\frac{4}{\varpi^2}$ de la composante que j'avais trouvée plus haut. Il serait donc assez indiqué de modifier la

formule que j'ai donnée en introduisant ce coefficient $\frac{4}{9}$ en multiplicateur du terme $\frac{2}{3}ef^{3}$, qui deviendrait ainsi $\frac{8}{27}ef^{3}$.

C'est ce que j'ai fait, et j'ai obtenu d'ailleurs ainsi des résultats qui cadrent bien mieux avec mes essais. C'est ce qu'on peut voir par le tableau suivant :

TYPES DES PORTES	FLÈCHES			OBSERVATIONS
	d'expérience (moyenne)	1re formule	2e formule	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	4,9 9,5 11,5 13,8	4,5 6,8 8,5 9,8	5,10 8,50 10,50 12,20	Expérience faite sur des vantaux presque neufs en service depuis quelques mois seulement.
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	3,5 7,8 9,8 12.1 13,7 15,2 15,4	3,0 4,8 6,3 7,2 7,9 8,7 9,3	3,5 5,5 7,2 8,8 9,7 10,6 11,3	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	1,34 8,83	4,8 8,7	5,6 10,7	
Canal de la Haute-Marne. Vantail amont.	6,83 4,08	6,5 2,0	8,7 2,1	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	0,37 4,29 6,04 11,10	0,5 5,4 7,5 8,8	0,6 6,3 9,1 9,2	
Idem.	0,75 7,15 10,50 10,60	2,3 5,7 7,8 7,9	2,4 6,8 9,5 9,5	
Canal de la Haute-Marne. Vantail aval.	3,09 7,25 1,40 2,37 1,14 1,65 1,52 1,51	3,5 5,8 1,0 1,2 0,45 0,5 0,45 0,45	3,6 6,7 1,6 1,2 0,45 0,5 0,45 0,45	J'ai déjà fait observer qu'un des côtés de ces panneaux à partir du troisième fléchit de 1 millimètre et peut fausser d'autant les flèches.

Le tableau que l'on vient de parcourir, semble prouver que les deux expressions sont en général assez satisfaisantes; la première, donnant des flèches très exactes pour les petites charges, serait peut-être aussi admissible que la seconde; mais, je trouve à cette dernière un grand avantage consistant en ce que, pour les grandes charges, elle indique toujours des flèches plus fortes que la première et conduit, par conséquent, à adopter des bordages plus épais.

Or, si l'on remarque que les portes, telles qu'*on les* construit aujourd'hui, c'est-à-dire avec des bordages très minces posés sur des fers d'épaisseur plus grande, sont certainement destinées à périr par usure des bordages; ou, tout au moins, présentent leur point faible en ces bordages, on serait amené à penser qu'il vaut mieux les faire un peu trop forts que d'employer des tôles un peu minces.

D'ailleurs, outre le risque d'oxydation, très grand pour les bordages, ceux-ci supportent aussi des tensions très élevées, et en tous cas de beaucoup supérieures à celles qui ont lieu dans les grosses pièces de la porte, de telle sorte que pour ces deux motifs, ce sont toujours les bordages qui constituent la partie faible d'un vantail et que c'est par eux que doit périr la porte.

Afin de donner une idée des tensions qu'ils supportent, je présente le tableau suivant des efforts par millimètre carré dans quelques-uns des bordages dont on a relevé les flèches.

Dans ce tableau, j'ai introduit dans la formule (2), non pas les flèches calculées, mais bien celles d'expérience afin de donner des tensions réelles et non des tensions calculées. Il faut même remarquer que ma formule de tension suppose que la plaque fléchit suivant une courbe circulaire et, par suite, qu'elle réduit l'importance à la fois de l'allongement et de la flexion, de telle sorte qu'aux

flèches observées, ont réellement correspondu des tensions plus élevées que celles indiquées par la formule.

TYPES DES PORTES	FLÈCHES observées (moyennes)	TENSIONS par millimètre carré horizontale	verticale
		kil.	kil.
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	4,9 9,5 11,5 13,8	1,8 4,8 6,5 8,8	2,0 5,4 7,3 9,8
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	3,5 7,8 9,8 12,1 13,7 15,2 15,4	1,3 4,0 5,6 7,7 9,5 11,2 11,4	2,2 6,7 9,4 12,9 15,8 18,7 19,1
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.	1,34 8,83	0,3 4,2	0,6 7,2
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval.	0,37 4,29 6,04 11,10	0,8 1,7 2,7 7,3	1,4 2,9 4,5 12,2
Idem.	0,75 7,15 10,50 10,60	1,8 3,5 5,8 6,3	3,1 5,9 9,7 10,6
Canal de la Haute-Marne. Vantail amont.	6.83 4,08	6,3 3,0	11,3 1,1
Canal de la Haute-Marne. Vantail amont.	3,09 7,25 1,40 2,37 1,14 1,65 1,52 1,51	2,2 7,7 0,8 1,6 0,7 1,0 0,9	1,3 6,4 4,5 9,1 5,3 11,5 10,2

La conclusion de ce tableau est évidemment que, dans la plupart des cas observés, les bordages travaillaient à une trop forte tension et celle-ci paraîtra encore bien plus exagérée quand on aura vu plus loin dans cette note, que, dans les mêmes portes, les grosses pièces, entretoises et montants, ne travaillaient au contraire qu'à d'assez faibles efforts.

Je crois donc devoir répéter qu'il convient d'employer au calcul des bordages la seconde formule que j'ai donnée et qui conduit à adopter de plus grandes épaisseurs.

Le problème se résoudrait donc par l'emploi des deux formules :

$$P = 32E\left(\frac{1}{\alpha^4}+\frac{1}{\beta^4}\right)\left(e^2f+\frac{8}{27}ef^3\right),$$

et

$$T_\alpha = \frac{4E}{\alpha^4}\left(\frac{2}{3}f^2+ef\right).$$

Des tables de calculs faits des valeurs de $e^2f+\frac{8}{27}ef^3$ et de $\frac{2}{3}f^2+ef$, ou un graphique de ces mêmes valeurs, placé à la fin de cette note, rendent ces calculs extrêmement rapides.

Si, par exemple, on veut calculer un bordage qui ne devra travailler qu'à n kilogramme par millimètre carré sous une pression de p, on calculera $10^6\,\frac{n\alpha^2}{4E}$ et $\frac{10^{12}p}{32E\left(\frac{1}{\alpha^4}+\frac{1}{\beta^4}\right)}$ et on entrera dans le graphique par les deux nombres ainsi obtenus : à l'intersection des deux lignes, on trouvera l'épaisseur à donner à la tôle et la flèche qu'elle prendra sous la charge.

Les résultats d'essais que j'ai donnés plus haut permettront d'avoir confiance dans le calcul ainsi conduit; en tous cas, il me semble qu'il est de beaucoup préférable aux moyens employés jusqu'à ce jour, moyens qui, en général, conduisent à des épaisseurs absolument impraticables. (Voir le *Cours de navigation intérieure* de M. Lagrené, t. II, p. 101 et suiv.)

Le moyen de calcul que je propose, n'est d'ailleurs qu'un moyen transitoire destiné à disparaître le jour où on aura appris à résoudre les équations d'une plaque

encastrée en tenant compte des tensions qui se développent pendant la flexion de la tôle; mais ce problème est peut-être encore loin d'être résolu et, en attendant sa solution, il convient de ne pas construire de portes qui puissent périr par leur bordage à un moment où leur carcasse n'aurait encore aucun mal.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DE LA CARCASSE D'UNE PORTE.

Le problème de la carcasse ou ossature d'une porte d'écluse a été étudiée plus que celui des bordages; cela a pu paraître plus utile, surtout à une époque où on construisait en bois soit la porte entière, soit au moins son bordage; mais, avec le système actuel de vantaux entièrement en fer, l'étude des plaques de bordage a un aussi grand intérêt que celle des fers qui les supportent.

Les études faites sur ce sujet, ont été de deux sortes : expérimentales avec M. l'inspecteur général Chevallier (*Annales de* 1850) et M. l'inspecteur général Guillemain (cours à l'École des ponts et chaussées), ou analytiques avec M. Lavoinne (*Annales de* 1867).

Il semble que, dans ce genre de questions, l'étude expérimentale soit la meilleure; car, si les géomètres ont obtenu un grand nombre de succès en poursuivant des recherches analytiques sur des questions de résistance de matériaux, cela a toujours été dans les problèmes de corps continus et les questions de calculs de corps, tels qu'une carcasse de porte d'écluse, composés d'une série de pièces isolées les unes des autres et ne se reliant qu'en quelques points, se sont toujours montrées rebelles aux efforts du calcul.

D'un autre côté, des expériences sur des portes

réelles ou sur des modèles du moins bien comparables avec la réalité, sont assez difficiles à faire.

Pour plusieurs personnes, les essais de M. Chevallier, au moyen des règles en bois mal reliées et auxquelles on appliquait des charges discontinues, travaillant seulement en quelques points, ne peuvent avoir qu'une ressemblance fort éloignée avec les résultats que donnent de vraies portes d'écluses, et pour ces mêmes personnes, les essais exécutés dernièrement par M. Guillemain, au moyen de règles en bois et de membranes en caoutchouc, pourraient bien aussi ne pas s'appliquer bien exactement aux portes d'écluses.

D'un autre côté, les calculs établis par M. Lavoinne peuvent paraître manquer par la base, et, en tous cas, avoir besoin d'une consécration pratique; la comparaison de leurs résultats avec les essais de M. Chevallier pouvant sembler insuffisante comme vérification.

Il conviendrait donc de vérifier la stabilité d'un grand nombre de portes exécutées et mises en service et d'essayer de démêler une règle au milieu d'une masse de résultats ainsi obtenus.

Évidemment, je n'ai pas pu mener à bien une telle étude; je ne pense même pas, en continuant pendant longtemps mes essais, pouvoir arriver à démontrer la règle dont je viens de parler; mon but, beaucoup plus modeste, a été de comparer les quelques essais que j'ai pu faire avec les prévisions fournies, soit par le calcul de M. Lavoinne, soit par un autre très semblable que j'ai imaginé.

Le calcul repose sur une fiction semblable à celle qui sert de base à la théorie générale de M. Lavoinne.

Lorsqu'il s'agit de calculer une porte, on se heurte à deux difficultés : ou bien on veut calculer chaque pièce isolément et alors on tombe sur des équations rebutantes, ou bien on se sert d'équations relativement simples;

mais alors on est obligé de supposer que la force de chaque pièce est uniformément répandue sur tout l'intervalle qui la sépare des voisines ou des points fixes.

Le premier mode conduit à des résultats si compliqués qu'aucune loi n'est saisissable; le second amène à des équations relativement simples et permettant des interprétations assez faciles; mais on doute de leur valeur réelle.

Le second moyen me paraît cependant être le seul praticable ; car, s'il force à introduire, comme bases du calcul, des suppositions qui s'éloignent de la réalité, il n'en constitue pas moins une méthode de fausse position capable de donner des aperçus clairs de ce qui doit se passer réellement et d'indiquer les points, qui, en pratique, seront les plus faibles; auxquels, par conséquent, il convient d'apporter à l'avance un surcroît de résistance.

C'est ce second mode que j'ai adopté; je n'ai fait que suivre, d'ailleurs, l'exemple donné par M. Lavoinne, en conduisant cependant le calcul par une voie plus claire et plus rapide.

Avant de donner ce calcul, je vais, comme pour les bordages, indiquer quelques résultats d'expériences.

§ I. — *Expériences sur la flexion des carcasses des portes.*

Les essais à la flexion des grosses pièces des portes ont été faits sur les portes du canal de la Marne à la Saône et sur celles du canal de Bourgogne. Ils ont été effectués au moyen d'un appareil très précis permettant de mesurer le 1/90 de millimètre.

J'avais espéré d'abord pouvoir arriver ainsi à me former une opinion sur la préférence qu'il pourrait y avoir lieu d'accorder à l'égal ou à l'inégal espacement des en-

tretoises. Mais soit que les différences de construction et surtout des assemblages, soit que la différence d'élasticité des fers aient dénaturé les résultats, je n'ai pu obtenir aucun renseignement à cet égard.

D'ailleurs, en y réfléchissant de plus près, je pense que chacun des systèmes peut être bon et économique suivant les dispositions d'ensemble et de détails adoptés.

Dans le tableau qui suit les entretoises sont comptées à partir du busc, la première au-dessus portant le n° 1.

Ce tableau contient aussi le poids par mètre carré de porte, ce poids pouvant servir de terme de comparaison.

TYPES DES PORTES	HAUTEUR de vantail	POIDS par mètre carré de portes	FLEXION des entretoises					OBSERVATIONS
			1	2	3	4	5	
Canal de la Marne à la Saône.		kilogr.						
Vantail amont.	2,865	168	1,2	»	»	»	»	
Id.	id.	id.	0,9	0.1	»	»	»	
Id.	id.	id.	1,2	0,2	»	»	»	
Canal de Bourgogne.								
Vantail amont.	2,825	200	0,47	0,42	0,14	»	»	
Canal de la Marne à la Saône.								
Vantail aval.	5,895	217	1,4	1,1	0,70	0,60	»	
Id.	id.	id.	0,95	1,1	0,80	0,20	»	
Id.	id.	id.	0,69	0,67	0,55	0,11	—0,31	
Id.	id.	id.	»	0,61	0,50	0,17	—0,21	
Id.	6,394	246	»	»	»	»	»	
Canal de Bourgogne.								
Vantail aval.	5,420	242	»	»	0,32	0,28	»	Flexion insensible en haut.
Canal de la Marne à la Saône.								
Vantail aval.	6,394	222	»	0,30	0,17	0,07	0,62	Porte noyée à l'aval.
Canal de Bourgogne.								
Vantail amont.	4,820	212	»	»	0,32	0,28	0,00	Flexion insensible en haut.
Id.	id.	id.	»	0.31	0,20	0,28	0,14	Ancien type.
Id.	id.	id.	»	0,22	0,13	0,21	—0,10	Type nouveau montant renforcé
Id.	id.	id.	»	0.43	0,48	0.18	0,03	Portes du même type et de la même fourniture.
Id.	id.	id.	»	0,48	0,45	0,29	0,04	
Id.	id.	id.	»	0,48	0,42	0,21	0,05	
Id.	id.	id.	»	0,35	0,48	0,40	0,03	

Ce tableau montre que les portes de faible hauteur, telles que celles d'amont, fléchissent sur toute leur hauteur et que toutes les entretoises prennent de la flèche vers l'aval. La plus forte flèche se trouve vers le bas, et généralement a lieu sur la première entretoise.

Cette flexion diminue ensuite au fur et à mesure qu'on monte.

Pour les portes de plus grande hauteur, il peut se présenter un fait assez remarquable, la partie supérieure de la porte peut fléchir vers l'amont repoussant ainsi l'eau qui s'appuie dessus. La forme de la porte fléchie reste bien à peu près semblable à celle d'une porte d'amont également déformée par la poussée; mais la partie supérieure rentre vers l'amont. Quant au point de flexion maxima, il est naturellement aussi vers le bas, mais tantôt à la première, tantôt à la seconde entretoise.

Ces divers résultats peuvent se comprendre à priori et ressortiront très clairement des indications du calcul. On prévoit, en effet, facilement que le montant intermédiaire, fléchi à sa partie basse suivant un arc dont les tangentes passent en amont de l'entretoise supérieure, tend à ramener celle-ci en amont.

Quant à la grandeur des flèches observées et inscrites au tableau ci-dessus, on la trouve très petite, surtout si l'on calcule qu'elles ne correspondent qu'à des tensions maximum de 3 ou 4 kilogrammes, tandis que nous avons vu que les bordages travaillent quelquefois à plus de 12 kilogrammes.

Je ne ferai pas maintenant d'autre réflexion sur ces essais; il vaudra mieux y revenir lorsque nous aurons essayé de calculer la porte. La comparaison du calcul et de l'expérience prendra alors un intérêt que l'étude des chiffres du tableau ci-dessus n'aurait pas.

§ II. — *Essais de calculs.*

M. Lavoinne a donné, dans les *Annales de* 1867, une très belle théorie des portes d'écluses et son calcul mérite la plus grande attention. Le calcul que je vais donner, concorde d'ailleurs, quant aux bases, avec celui de M. Lavoinne, mais j'ai pu, en le conduisant d'une façon différente, parvenir à des expressions moins compliquées et, par suite, plus claires et plus faciles à calculer.

Je suppose, avec M. Lavoinne, que chaque entretoise et chaque montant est réparti sur toute la surface de la porte; en d'autres termes, je cherche le moment de résistance total à la flexion dans le sens horizontal et dans le sens vertical, puis, divisant par la dimension correspondante, j'en prends la moyenne. J'ai ainsi une porte dont le moment d'inflexibilité est, pour une longueur égale à l'unité, k^4 dans le sens de la flexion horizontale et k_1^4 dans le sens rectangulaire.

Dans cette supposition, la poussée de l'eau en chaque point est équilibrée par la somme des efforts tranchants autour du point considéré, augmentée de la composante normale des compressions horizontales, dues à la butée des vantaux.

On arrive ainsi en prenant un axe des x horizontal, celui des y vertical, en appelant Z la flexion en un point et T la compression due à la butée des vantaux que je suppose provisoirement s'exercer sur le feuillet moyen de la porte, à l'équation indéfinie suivante :

$$k^4 \frac{d^4Z}{dx^4} + k_1^4 \frac{d^4Z}{dy^4} - T \frac{d^2Z}{dx^2} = p.$$

p étant la pression en ce point par unité de surface.

Plaçons l'axe des x suivant l'arête du busc, celui des y suivant un des côtés verticaux et soient a la largeur totale de la porte et H la hauteur.

Les conditions à satisfaire aux limites sont :

$$Z = 0 \quad \text{pour} \quad x = 0, \quad \text{pour} \quad x = a \quad \text{et pour } y = 0;$$

$$\frac{d^2Z}{dx^2} = 0 \quad \text{pour} \quad x = 0 \quad \text{et} \quad x = a;$$

et $$\frac{d^2Z}{dy^2} = 0 \quad \text{pour} \quad y = 0 \quad \text{et} \quad y = H.$$

On satisfait à toutes ces conditions et à l'équation indéfinie en posant :

$$Z = \Sigma Y \sin \frac{m\varpi x}{a}.$$

Y étant en fonction de y et de m, m étant un nombre entier compris entre 1 et ∞.

C'est ce que je vais faire voir.

Par cette valeur de Z l'équation différentielle devient :

$$p = \Sigma\left[\left(\frac{k^4 m^4 \varpi^4}{a^4} - T\frac{m^2\varpi^2}{a^2}\right)Y + k^4\frac{d^4Y}{dy^4}\right]\sin\frac{m\varpi x}{a},$$

soit, en posant

$$p = \Sigma\left(Y + k_1^4\frac{d^4Y}{dy^4}\right)\sin\frac{m\varpi x}{a}.$$

Il faut que cette égalité ait lieu pour une valeur quelconque de x entre o et a ; on peut pour cela déterminer le coefficient de $\sin \frac{m\varpi x}{a}$ par le moyen indiqué par Lagrange, en posant :

$$\int_0^a p \sin\frac{m\varpi x}{a}\,dx = \int_0^a \Sigma\left(Y + k_1^4\frac{d^4Y}{dy^4}\right)\sin\frac{m\varpi x}{a}\sin\frac{m\varpi x}{a}\,dx.$$

On trouve ainsi :

$$\mu^4 Y + k^4\frac{d^4Y}{dy^4} = \frac{4p}{m\varpi}.$$

soit, en appelant δ la densité de l'eau

$$\mu^4 Y + k^4\frac{d^4Y}{dy^4} = \frac{4\delta(H-y)}{m\varpi}.$$

Cette équation différentielle se résout facilement comme il suit, Posons :

$$\mu^4 Y = \frac{4\delta(H-y)}{m\varpi} + u.$$

l'équation devient :

$$u + \frac{k_1^4}{\mu^4}\frac{d^4Y}{dy^4} = 0,$$

soit

$$\frac{d^4Y}{dy^4} + \tau^4 u = 0,$$

où on aura

$$\tau = \frac{\mu}{k_1},$$

équation que l'on sait admettre la solution

$$u = c_1 e^{\alpha_1 y} + c_2 e^{\alpha_2 y} + c_3 e^{\alpha_3 y} + c_4 e^{\alpha_4}$$

où α_1 α_2... sont les racines de :

$$\alpha^4 + \tau^4 = 0,$$

et c_1 ... des coefficients arbitraires.

On prendra donc

$$Y = \frac{4\delta(H-y)}{\mu^4 m\varpi} + c_1 l^{\alpha_1 y} + c_2 l^{\alpha_2 y} \ldots,$$

et l'expression de Z fournie avec cette valeur de Y satisfera à l'équation différentielle.

Il restera trois conditions aux limites à satisfaire, savoir :

$$Z = 0 \quad \text{pour} \quad y = 0,$$
$$\frac{d^2Z}{dy^2} = 0 \quad \text{pour} \quad y = 0 \quad \text{et} \quad y = H;$$

mais l'expression ainsi formée possède quatre coefficients arbitraires; or, comme la dernière condition, $\frac{d^2Z}{dy^2} = 0$ pour $y = H$, se décompose en deux, à cause des imaginaires qu'elle contient, nous arriverons juste à satisfaire à toutes les conditions en déterminant les quatre coefficients.

Le calcul de ces quatre équations ne présente ni difficultés, ni intérêt ; je ne le reproduis donc pas et me contente de donner le résultat final.

On arrive à :

$$Z = \sum_{1}^{\infty} \frac{4\delta \sin \frac{m\varpi x}{a}}{m\varpi\left(\frac{k^4 m^4 \varpi^4}{a^4} - T\frac{m^2\varpi^2}{a^2}\right)} \left[H - y - H\cos\theta y \frac{\text{coh.}\,\theta(H-y)}{\text{coh.}\,\theta H}\right].$$

dans laquelle j'ai, pour abréger, écrit θ au lieu de $\frac{\tau}{\sqrt{2}}$ qui vaut :

$$\frac{\mu}{k_1\sqrt{2}} = \frac{1}{k_1\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{k^4 m^4 \varpi^4}{a^4} - T\frac{m^2\varpi^2}{a^2}},$$

et où le signe coh. représente, comme d'habitude, le cosinus hyperbolique.

Cette expression donne bien la solution du problème au moyen d'une suite infinie de termes ; mais on remarque de suite que ces termes contiennent m^5 au dénominateur, vu que le terme en Tm^2 est, en général, absolument négligeable devant l'autre ; que, par suite, on peut, en général et sans erreur sensible, se contenter du premier terme.

En examinant même la question de plus près, on voit que, sauf pour y petit, le terme $H\cos\theta y \frac{\text{coh.}\,\theta(H-y)}{\text{coh.}\,\theta H}$ est toujours très petit en comparaison du terme en $H-y$, de sorte que les termes successifs de la série décroissent à peu près comme ceux de la série $\frac{1}{m^5}$, et comme les m ne contiennent que les nombres impairs, le second terme ne serait plus que le $\frac{1}{243}$ du premier et le troisième $\frac{1}{3125}$ de ce même premier terme.

Il suffira donc, en général, de prendre :

$$(3)\quad Z = \frac{4\delta \sin \frac{\varpi x}{a}}{\varpi\left(\frac{k^4\varpi^4}{a^4} - \frac{T\varpi^2}{a^2}\right)}\left[H - y - H\cos\theta y\,\frac{\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}\right].$$

Si maintenant on voulait tenir compte de la contre-pression exercée par l'eau du bief aval et qui s'élève jusqu'à la hauteur h au-dessus du busc, il faudrait prendre pour Z les expressions suivantes :

1° Au-dessus du bief aval :

$$(4)\quad Z = \frac{4\delta \sin \frac{\varpi x}{a}}{\varpi\mu^4}\left[H - y - \cos\theta y\,\frac{\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}(H-h)\right].$$

2° Au-dessous du bief aval :

$$(5)\quad Z = \frac{4\delta \sin \frac{\varpi x}{a}}{\varpi\mu^4}\left[H - h - \cos\theta y\,\frac{\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}(H-h)\right];$$

mais il convient en général, de calculer les portes sans tenir compte de cette contre-pression qui peut manquer un jour, et ces expressions ne sont intéressantes qu'en ce qu'elles permettent de voir quel effet peut produire la contre-pression.

De même si, la pression d'aval s'exerçant comme on vient de dire, l'eau en amont ne s'élevait qu'à la hauteur H', il faudrait prendre des expressions de la forme :

$$Z = \frac{4\delta \sin \frac{\varpi x}{a}}{\varpi\mu^4}\left[H' - y - (H'-h)\,\frac{\cos\theta y\,\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}\right],$$

et

$$Z = \frac{4\delta \sin \frac{\varpi x}{a}}{\varpi\mu^4}\left[H' - h - (H'-h)\,\frac{\cos\theta y\,\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}\right];$$

mais ces expressions n'ont aucun intérêt pratique et ne sont que curieuses. Je m'en suis cependant servi quelquefois pour calculer mes essais et voir de plus près si les calculs et l'expérience étaient d'accord.

Avant de réduire ces formules en chiffres et de les appliquer à des cas expérimentés, il convient de voir quelle marche générale elles assignent à la flexion des portes et comment elles peuvent être utilisées en pratique.

En chaque point, cette flexion dépend surtout des deux coefficients :

$$\mu^4 = \frac{k^4\pi^4}{a^4} - \frac{\mathrm{T}m^2}{a^2}, \quad \text{et} \quad \theta^4 = \frac{\mu^4}{4k^4}.$$

Or μ^4 peut en général se réduire à $\frac{k^4\varpi^4}{a^4}$, le terme en T étant généralement assez petit devant le premier.

Dans les portes de canaux $\frac{\varpi}{a}$ est très voisin de l'unité, et tandis que $k^4 = \mathrm{EI}$, c'est-à-dire le produit du moment d'inertie par le coefficient d'élasticité (2×10^{10}), atteint une valeur de l'ordre de 10^6 ou 10^7, le terme T reste généralement de l'ordre de 10^2 ou 10^3.

On peut donc tout d'abord supprimer le terme en T.

Mais on a encore un meilleur motif pour le faire. On sait, en effet, qu'en chanfreinant les poteaux busqués sur leur arête d'amont, on peut arriver à faire passer la tension T bien en aval du plan neutre de la porte et par suite, employer cette compression à diminuer le moment fléchissant de la porte. Si l'on opère ainsi et que, dans le calcul, on néglige l'effet de T, on ne pourra qu'être conduit à augmenter un peu la force des entretoises ; ce qui ne peut avoir aucun inconvénient sérieux, car l'augmentation, ainsi obtenue, sera relativement très faible.

Cependant, si l'on voulait tenir compte de T et de son excentricité, il serait facile de construire une équation différentielle qui s'intégrerait par les mêmes procédés ; mais il paraît bien meilleur de ne pas compter sur cette compression et de s'en servir pour renforcer la porte en

la faisant travailler en sens contraire de la poussée de l'eau.

En opérant ainsi, on réduira l'expression de Z à la suivante :

$$Z = \frac{4\delta a^4 \sin \frac{\varpi x}{a}}{\pi^4 k^4} \left[H - y - H \cos \frac{k \varpi y}{k_1 a \sqrt{2}} \; \frac{\text{coh.} \frac{k \varpi}{k_1 a \sqrt{2}} (H - y)}{\text{coh.} \frac{k \varpi}{k_1 a \sqrt{2}} H} \right].$$

Cette formule indique que la flexion dépend surtout de la portée horizontale de la porte et qu'elle croît à peu près comme la quatrième puissance de cette portée, et qu'inversement elle dépend beaucoup aussi du moment d'inflexibilité horizontale et décroît proportionnellement à ce moment.

On remarque aussi que la valeur de Z est la différence de deux quantités de forme très différente. L'une ayant la forme $M(H - y)$ croît linéairement du sommet de la porte où elle est nulle, au fond du sas où elle atteint la valeur MH; en d'autres termes, cette quantité croît comme la pression de l'eau.

Cette première quantité ne dépend d'ailleurs que du coefficient de rigidité horizontal.

L'autre se présente sous la forme :

$$\frac{N}{k^4} = \cos \frac{k \pi y}{k_1 a \sqrt{2}} \; \frac{\text{coh.} \frac{k \pi}{k_1 a \sqrt{2}} (H - y)}{\text{coh.} \frac{k \pi H}{k_1 a \sqrt{2}}}.$$

Elle varie d'une manière différente. Sur le busc, pour $y = 0$, elle vaut $\frac{N}{k^4}$; puis elle diminue à mesure que y augmente, c'est-à-dire qu'on remonte le long de la porte, jusqu'au moment où $\frac{k \varpi y}{k_1 a \sqrt{2}} = \frac{\varpi}{2}$; à ce moment elle s'annule.

Plus haut, elle devient négative et sa valeur absolue

se réduit à cause du terme coh. $\theta(H-y)$ qui tend vers 1; elle reste ainsi négative jusqu'à ce que $\frac{k\varpi y}{k_1 a\sqrt{2}}=\frac{3\varpi}{2}$, soit jusqu'à une valeur de y qui soit triple de celle qui l'a annulée une première fois.

Lorsqu'on arrive au sommet de la porte, elle prend la valeur $\frac{N}{k^4}\frac{\cos\theta H}{\text{coh.}\theta H}$ qui est généralement assez petite et peut être positive ou négative suivant que θH est compris entre $-\frac{\varpi}{2}$ et $\frac{\varpi}{2}$ ou entre $\frac{\varpi}{2}$ et $-\frac{\varpi}{2}$.

Ce second terme dépend d'ailleurs principalement des rapports $\frac{k}{k_1}$ et $\frac{H}{a}$; c'est-à-dire des rapports des dimensions de la porte et des moments d'inflexibilité suivant les deux sens.

En particulier, si $\frac{k}{k_1}$ est très grand, c'est-à-dire si les entretoises sont nombreuses et fortes et les montants verticaux très faibles ou nuls, ce second terme disparaît et la porte fléchit en chaque point proportionnellement à la charge d'eau en ce même point.

Inversement si les montants sont extrêmement puissants, ce second terme se réduit à H et la flexion est au contraire d'autant plus forte qu'on considère un point plus rapproché du sommet de la porte.

Ces deux résultats sont en effet intuitifs.

En résumé, le premier terme représente en quelque sorte les résultats à obtenir d'une porte dépourvue de son système vertical; le second, au contraire, corrige le premier des effets dus à la rigidité verticale, et reporte sur les entretoises supérieures une partie de la charge de celles qui sont au-dessous.

En fixant donc convenablement le rapport $\frac{k}{k_1}$ et par

suite la valeur de ce terme, on pourra faire que le maximum de flexion se trouve à tel endroit que l'on voudra de la porte. On ne pourra d'ailleurs pas arriver à faire fléchir également les entretoises, si on les prend de même force et également distantes l'une de l'autre, car l'expression de Z aura toujours un maximum. On n'arrivera donc pas à avoir des entretoises également chargées; mais on pourra mettre le maximum où l'on voudra, de telle sorte qu'en le plaçant vers le milieu on aura une quasi-constance suffisante en pratique.

Ces remarques deviennent peut-être encore plus sensibles quant au lieu de la flexion on considère le moment fléchissant.

Si on le prend à son point maximum pour chaque hauteur, c'est-à-dire au milieu de la porte, on a, par unité de hauteur :

$$(6) \quad k^4 \frac{d^2Z}{dx^2} = \frac{4\delta a^2}{\pi^3}\left[H - y - H\cos\theta y\, \frac{\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}\right].$$

En remarquant que π^3 vaut environ 31 et que par suite $\frac{4}{\pi^3}$ est peu éloigné de 1/8, on pourra prendre par approximation :

$$\frac{\delta a^2}{8}\left[H - y - H\cos\theta y\, \frac{\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh}\,\theta H}\right.$$

On reconnaît alors dans le terme principal $\frac{\delta a^2(H-y)}{8}$ la valeur même du moment fléchissant calculé d'après les règles ordinaires; et quant au second terme, on voit qu'il représente ce même moment pris au fond et multiplié par un coefficient en Cos Coh qui diminue quand on s'élève le long de la porte. En particulier, lorsqu'on arrive à la hauteur y, pour laquelle le Cos. s'annule, la flexion y est exactement la même que si les montants verticaux n'existaient pas. Au-dessous, la flexion est la plus faible, au-dessus elle est plus grande.

Le tracé séparé du terme principal et du terme correctif ne manque pas non plus d'intérêt; il montre que les portes peuvent, avec les dimensions usuelles, présenter deux formes bien différentes : l'une présentant constamment sa courbure du côté de l'amont; l'autre, au contraire, changeant son sens de courbure, de telle sorte qu'à la partie haute la direction des derniers éléments est vers l'aval; on voit aussi qu'il peut arriver fréquemment que la pression ait pour effet de faire rentrer vers l'amont la partie supérieure de la porte. En tous cas, comme je l'ai dit déjà, il y a toujours un point où la flexion est maxima et où, par suite, les fers travaillent le plus; c'est ce point qu'il est surtout intéressant de connaître si l'on s'est imposé la condition d'avoir des entretoises égales et également espacées.

Théoriquement, cette question ne présente aucune difficulté, puisqu'elle consiste à résoudre l'équation $\frac{dZ}{dy}=0$ qui est :

$$\sin \theta y \operatorname{coh.} \theta (H - y) + \cos \theta y \sin \theta (H - y) = \frac{\operatorname{coh.} \theta H}{\theta H},$$

mais, en pratique, la solution de cette équation transcendante est fort difficile.

Il vaudra infiniment mieux, en général, opérer par tâtonnement sur l'équation en Z ou sur celle en $\frac{d^2 Z}{dx^2}$ et voir à quelle valeur de y correspond le maximum. On saura de cette façon à quelle flexion maxima il faut résister et par suite quels fers il faut employer.

Ces réflexions sur les équations du problème comportent encore celle-ci au sujet des équations (4) et (5), concernant le cas où l'on tient compte de la contre-pression du bief d'aval. Dans ce cas, l'équation (5) montre que, probablement, toute la partie noyée travaillera moins que si elle était libre, vu que le terme principal ne peut pas

dépasser la valeur qu'il acquiert pour le niveau du bief d'aval; mais pour toute la partie de la porte qui se trouve au-dessus de ce bief d'aval, il peut, au contraire, arriver que la contre-pression augmente la flexion. Le terme principal est en effet le même que si le bief d'aval n'existait pas et le terme correctif est moindre; si donc le cos θy est positif, la flexion sera augmentée.

On pourra d'ailleurs, dans chaque cas, voir, d'après la valeur de h et du rapport $\frac{k}{k_1}$, si les flexions tant au-dessous qu'au-dessus du plan d'eau d'aval seront augmentées ou diminuées par cette contre-pression.

Il resterait à résoudre une question qui, pour un grand nombre de personnes, est capitale et qui parait en effet l'être quand on se reporte aux essais de M. Chevallier. Il est vrai que, depuis ceux-ci, les expériences de M. l'inspecteur général Guillemain ont montré que les résultats donnés par le premier n'étaient pas à l'abri de tout reproche.

Faut-il, dans une porte d'écluse, employer des entretoises égales et également espacées, ou bien faut-il, tout en conservant des entretoises égales, les rapprocher d'autant plus que la pression de l'eau par unité de surface augmente et régler cet espacement d'une façon proportionnelle à l'inverse de cette pression?

Les calculs de M. Lavoinne n'ont pas tranché cette question; ceux qu'on a lus plus haut ne la tranchent pas davantage.

Ce que j'ai calculé, de même que ce qu'avait calculé M. Lavoinne, n'est qu'une règle de fausse position. L'hypothèse fondamentale est que la porte se compose d'une série d'entretoises jointives de même force, soutenues par une autre série de montants jointifs, également de même force.

Évidemment l'hypothèse la plus voisine serait qu'on

réunit ensemble un nombre donné de ces entretoises, ce qui conduit à des entretoises égales et également espacées. Les calculs s'appliquent donc, indépendamment du cas d'un nombre très grand d'entretoises, au cas de l'égalité de force et d'espacement plutôt qu'à tout autre.

Mais à ce degré d'approximation ils peuvent fort bien s'appliquer aussi à une autre distribution des entretoises, et en particulier à celle dans laquelle on les rapproche proportionnellement à la poussée de l'eau.

On peut du reste, sans calculs, se faire une idée de la meilleure manière de répartir les entretoises. Il suffit pour cela de considérer deux cas extrêmes, celui de montants extrêmement rigides et celui, au contraire, où les montants n'existent pas et où toutes les entretoises sont indépendantes, où, de plus, on a eu le soin de couper le bordage au droit de chacune d'elles.

Il est bien évident que, dans ce second cas, il convient de réserver à chaque entretoise la même charge et, par suite, de régler leur écartement suivant une loi inversement proportionnelle à la profondeur au-dessous de l'eau. On arrivera ainsi à l'égalité de charge pour toutes, sauf les deux extrêmes : celle du sommet et celle du busc. Si, au contraire, les montants sont extrêmement rigides, ils prendront un point d'appui sur le busc et reporteront toute la charge en haut; alors, il faudrait aussi reporter toutes les entretoises au sommet de la porte.

Ainsi, pour une rigidité verticale nulle, il faut rapprocher les entretoises suivant la pression de l'eau et pour une rigidité verticale très grande les porter au contraire toutes au sommet.

A une rigidité intermédiaire doit évidemment correspondre aussi un espacement intermédiaire; mais on voit que cet espacement n'est pas forcément l'équidistance.

Comme l'a démontré M. Lavoinne et comme le montrent les formules de cette note, cet espacement dépen-

dra surtout du rapport des rigidités horizontales et verticales ; l'équidistance ne sera qu'un cas exceptionnel.

Il me semble donc qu'il n'y a pas lieu d'adopter, de parti pris, l'équidistance des entretoises, mais surtout, qu'on ne doit jamais se croire obligé de disposer des entretoises d'une façon inversement proportionnelle à la pression de l'eau, surtout en raison de ce que cette disposition est souvent gênante quand les portes doivent recevoir des vannes. Comme l'a dit M. l'inspecteur général Guillemain, dans son cours à l'École des ponts et chaussées, ce n'est pas au bas, mais bien vers le tiers inférieur ou même un peu plus haut que les portes fatiguent le plus et c'est en ce point, et non vers le bas, qu'il faut augmenter leur force.

D'un autre côté, la considération du bordage porterait à rapprocher les entretoises au fur et à mesure qu'on descend sous l'eau, de façon que, tout en n'employant qu'un seul échantillon de tôles, le travail par millimètre carré restât à peu près constant.

Ainsi, d'un côté, la considération de la résistance de la porte elle-même pousse à placer les entretoises à peu près à une distance fixe l'une de l'autre, quoique moindre autour de la partie correspondante au 1/3 inférieur de la porte ; de l'autre, la considération du bordage amène à les rapprocher au bas. C'est donc une position intermédiaire entre ces deux-ci qu'il faut choisir ; mais pour foire ce choix, il me semble qu'on ne peut guère se laisser guider que par des considérations de goût et d'aspect.

On peut, il est vrai, supprimer tout montant et alors il faut des entretoises inversement espacées à la pression de l'eau ; mais, si l'on remarque, dans l'étude faite ci-dessus des bordages, que la portée horizontale de ceux-ci intervient, dans leur résistance, par sa quatrième puissance, on sera, je crois, forcément amené à ne pas adopter cette

solution. Il n'y aurait que dans le cas où le bordage devrait être en bois qu'on jugerait en sens contraire.

En résumé, il paraît donc rationnel d'adopter la règle suivante : l'écartement des entretoises sera d'autant plus rapproché de l'équidistance que la rigidité verticale sera plus grande et, au contraire, il se rapprochera d'une loi inverse de la pression de l'eau si l'on adopte une rigidité verticale moindre. Cette loi d'écartement dépend d'ailleurs du rapport des rigidités verticale et horizontale et des dimensions de la porte et ne pourra être fixé que dans chaque cas particulier.

Ce qui sera plus important, semble-t-il, sera de se servir des formules données plus haut pour corriger les points qu'elles indiqueraient comme trop faibles ou trop forts.

On déterminera d'abord la répartition approximative que l'on veut adopter soit pour les entretoises, soit pour les montants, et on se guidera dans ce choix par des considérations relatives au bordage, ou par telles autres qu'on jugera bon de faire intervenir.

On pourrait en particulier se servir des considérations suivantes :

On sait, d'après Navier, qu'une plaque, appuyée sur ses quatre bords, transmet à chacun d'eux une partie du poids total proportionnelle au carré de la longueur du côté.

Mais la connaissance de cette loi n'est pas absolument nécessaire pour démontrer la proposition que j'ai en vue ; il suffit de supposer que chaque côté du cadre reçoit une part de pression proportionnelle à la puissance n de sa longueur.

Soit donc une porte dont, à un point donné, deux entretoises sont à une distance b l'une de l'autre ; leurs milieux sont réunis par un montant, et la longueur des entretoises est $2a$.

Chaque panneau supporte une pression totale pab, p étant la charge d'eau au milieu.

Chaque moitié d'entretoise porte $\frac{pab}{2} \times \frac{a^n}{a^n + b^n}$ et le montant $\frac{pab}{2} \times \frac{b^n}{a^n + b^n}$.

Les panneaux voisins donnent des poids à peu près égaux, en sorte que chaque demi-entretoise porte $pab \frac{a^n}{a^n + b^n}$ et chaque entretoise entière $2pab \frac{b^n}{a^n + b^n}$.

Le moment d'inertie de ces pièces, et, par suite, leur poids par unité de longueur, est proportionnel à ces pressions, multipliées par la longueur des pièces, et pour avoir le poids total, il faut multiplier le poids unitaire par la longueur des pièces.

Chaque entretoise pèse donc

$$K.2pab \frac{a^n}{a^n + b^n} 2a.2a,$$

et le montant

$$K.p.ab \frac{b^n}{a^n + b^n} b.b.$$

Si l'on considère que chaque entretoise n'appartient que pour moitié au panneau, le poids total de carcasse de la partie de porte comprise entre les deux entretoises et d'une surface $2ab$, sera

$$K \frac{pab}{a^n + b^n} (4a^{n+2} + b^{n+2}),$$

et le poids au mètre carré de porte sera

$$K \frac{pab}{2ab} \frac{1}{a^n + b^n} (4a^{n+2} + b^{n+2}).$$

Il est donc proportionnel à la quantité

$$\frac{4a^{n+2} + b^{n+2}}{a^n + b^n};$$

et si l'on pose $b = xa$, le poids au mètre carré sera proportionnel à $a^2 \frac{4 + x^{n+2}}{1 + x^n}$.

Y a-t-il une valeur de x qui rende ce poids minimum? Pour le voir, je prends la dérivée en x, savoir :

$$\frac{(1 + x^n)(n + 2)x^{n+1} - (4 + x^{n+2})nx^{n-1}}{(1 + x^n)^2},$$

et je cherche les racines de

$$(1 + x^n)(n + 2)x^{n+1} - (4 + x^{n+2})nx^{n-1}$$
$$= x^{n-1}[(n + 2)(1 + x^n)x^2 - n(x^{n+2} + 4)] = 0,$$

ce qui donne

$$x^{n-1} = 0,$$

et

$$(n + 2 - n)x^{n+2} + (n + 2)x^2 - 4n = 0,$$

ou

$$2x^{n+2} + (n + 2)x^2 - 4n = 0.$$

Cette dérivée est négative pour $x = 0$; le poids est donc maximum quand les entretoises se touchent toutes ou sont très près l'une de l'autre. Quand on les espace davantage, le poids diminue jusqu'à la valeur de x qui annule le polynôme ci-dessus; on peut trouver cette valeur pour chaque valeur de n.

On voit de suite que pour toutes les valeurs de n supérieur à 1, la racine x est plus grande que 1.

On voit aussi que cette racine est inférieure à $x^2 = \frac{4n}{n + 2 + 2x^n}$, ou bien comme $x > 1$, qu'on peut être assuré que $x^2 < \frac{4n}{n + 4}$; x varie donc de 1 à 2.

En particulier, pour $n = 2$, valeur très probable, on a

$$2x^4 + 4x^2 - 8 = 0,$$

d'où

$$x = \sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4}},$$

soit 1.12.

Ainsi, le poids du mètre carré de carcasse est aussi petit que possible lorsque les panneaux sont à peu près carrés.

Si l'on tient compte que le poids du mètre carré de bordage croît à peu près comme la première puissance de l'écartement des entretoises, mais qu'il n'est en général que le tiers ou le quart de celui de la carcasse, on s'arrêtera à cette conclusion, que les entretoises doivent être espacées d'un peu moins que leur demi-longueur et les panneaux devront être un peu plus larges que haut, mais se rapprocher sensiblement du carré.

Quant aux panneaux inférieurs, il est bien évident qu'on peut leur donner avec avantage un peu plus de hauteur, si du moins l'épaisseur du bordage le permet; car on reportera ainsi une plus forte partie de la charge sur le busc et les côtés verticaux du cadre qui, étant appuyés, sont toujours assez forts.

Ces résultats s'aperçoivent, *à priori*, en remarquant que lorsque les panneaux ont peu de hauteur, toute la charge d'eau est reportée sur les points fixes par l'intermédiaire des entretoises, tandis qu'au fur et à mesure qu'on les allonge dans le sens de la hauteur, une partie de plus en plus grande de la charge est reportée sur les points fixes par le bordage lui-même, et, si l'on fait attention qu'inversement cet allongement vertical des panneaux a pour résultat de charger davantage le montant et de forcer à en augmenter l'équarrissage; de telle façon qu'à partir d'une certaine hauteur, cet excès de poids du montant compense ce que l'on gagne sur les entretoises, on arrive au poids minimum. C'est vraisemblablement pour ce motif que lorsque l'on étudie un projet de portes d'après les principes des portes de l'écluse d'Ablon, on arrive à beaucoup de poids lorsque ces portes s'éloignent sensiblement de la forme carrée et pourquoi ces principes conduisent à un prix très avantageux pour des

portes d'amont dans un canal, tandis qu'au contraire ils semblent conduire à des portes d'aval très lourdes.

Des calculs analogues montrent que si l'on adapte deux montants, il faut encore donner aux panneaux une hauteur voisine de la moitié de la largeur de la porte, mais plus faible.

Mais toute cette discussion repose sur des considérations qui ne sont pas à l'abri de tout reproche, et tout en pensant que la meilleure disposition à adopter dans une porte à un seul montant est de faire des panneaux carrés, je suis loin d'être certain de l'exactitude de ce principe. On pourra cependant s'en servir pour fixer approximativement le nombre d'entretoises à employer.

On se décidera ainsi à employer n entretoises horizontales et p montants verticaux, et on déterminera ainsi le rapport $\frac{k}{k_1}$ des rigidités dans les deux sens rectangulaires.

On cherchera la flèche correspondante (k restant indéterminé) qui se produirait vers le tiers inférieur de la porte et, comme la largeur d'enclave détermine la hauteur d'âme maxima à donner aux entretoises, on en déduira la valeur à donner à k pour que cette flèche corresponde à tel travail qu'on voudra par millimètre carré.

Cela fait, k et k_1 étant fixés, la porte est bien déterminée; on calculera alors la flèche et la tension en chaque point et on fortifiera par des semelles supplémentaires les points où on aura reconnu des tensions trop fortes. Au besoin, on diminuera, au contraire, les parties qu'on trouverait être beaucoup trop fortes.

Ces corrections pourront ainsi se faire en repprochant les entretoises trop chargées et éloignant celles qui paraissent ne pas l'être assez, et on sera conduit ainsi à un mode de répartition à inégal espacement qui se rappro-

chera plus ou moins de la loi inverse de la pression de l'eau.

Du reste, après avoir comparé les résultats de ces calculs avec l'expérience, je reproduirai ici l'étude que j'ai faite pour un vantail d'aval pour écluse de $3^{m},50$ de chute, qui me servira d'indication des moyens à employer.

§ III. — *Comparaison de l'expérience avec le calcul.*

Le tableau de comparaison qui suit a été formé au moyen du tableau des essais déjà donné, complété par une colonne de flèches calculées d'après la formule (3) à laquelle m'a conduit le calcul.

J'ai tenu compte, dans le calcul, des moments d'inertie des entretoises, des montants et de la rigidité du bordage en tôle.

Ce tableau contient aussi des colonnes intitulées φ et qui donnent les flèches calculées dans les mêmes suppositions, d'après la méthode indiquée par M. Lavoinne. Il permet ainsi de comparer les formules de cet ingénieur avec les résultats pratiques, ce qui, je crois, n'avait pas encore été expérimenté.

En appliquant la formule de M. Lavoinne, je n'ai d'ailleurs pas tenu compte de la butée des vantaux parce que les portes que j'ai soumises à l'expérience sont toutes disposées pour que cette butée tende à diminuer la flèche.

Les résultats donnés par ma formule (3) sont indiqués dans les colonnes intitulées F.

TYPES DES PORTES	FLÈCHES Expériences	F	φ	OBSERVAVIONS
Canal de la Marne à la Saône. Vantail amont.				Essais sur des portes neuves en service depuis quelques mois seulement. Un an après on n'a trouvé que des flèches négligeables de 0,010 ou 0,2; mais il est vrai qu'on n'a pas pu refaire les expériences à charge complète.
1re entretoise..........	1,2 0,9 1,2			
Moyenne.......	1,1	0,57	1,50	
2e entretoise..........	0,15 0,20			
Moyenne.......	0,175	0,04	1,34	
Canal de Bourgogne. Vantail amont.				Portes dont les diverses parties du montant sont très faiblement réunies. Les φ n'ont pas été calculés.
1re entretoise..........	0,47	0,28	»	
2e id.	0,42	0,26	»	
3e id.	0,14	0,12	»	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval. 3 mètr. de chute.				
1re entretoise..........	1,40 0,95 0,69			
Moyenne.......	1,01	1,93	2,28	
2e entretoise..........	1,10 1,40 0,67 0,61			
Moyenne.......	0,95	2,27	2,60	
3e entretoise..........	0,70 0,80 0,55 0,50			
Moyenne.......	0,64	1,66	2,07	
4e entretoise..........	0,80 0,20 0,11 0,17			
Moyenne.......	0,27	0,83	1,28	
5e entretoise (dessus).....	—0,31 —0,21			
Moyenne.......	—0,26	—0,025	+0,22	
Canal de la Marne à la Saône. Vantail aval. $3^{m},50$ de chute.				Expériences faites avec une tenue d'eau de $1^{m},65$ seulement au lieu de $2^{m},20$. Bief aval plein. Les calculs tiennent compte de ces circonstances. Les calculs de φ supposent le bief amont plein ; les formules de M. Lavoinne ne paraissant pas disposées pour tenir compte des conditions de l'expérience.
1re entretoise..........	Non mesurées en expérience	1,20	2,36	
2e id.		1,78	2,24	
3e id.	0,62 0,30	1,49	1,83	
4e id.	0,43 0,17	8,83	0,87	
5e id.	0,07	0,15	0,21	
6e id.	—0,02	—0,01	—0,10	

TYPES DES PORTES	FLÈCHES			OBSERVATIONS
	Espé-riences	F	φ	
Canal de Bourgogne. Moyen. des portes, 1, 9, 21, 22.				
3e entretoise	0,43	1,16	»	Flèches trouvées à peu près toutes trois fois trop grandes.
4e id.	0,45	1,14	»	
5e id.	0,27	0,81	»	
6e id.	0,04	0,12	»	

On remarque tout d'abord que la formule (3) de même que les formules de M. Lavoinne donnent des flèches beaucoup plus élevées que celles constatées aux essais. Cela devait être en effet et cela doit tenir, pour une grande part, à ce que nous n'avons pas mis en compte l'excentricité de la butée des vantaux relativement au feuillet moyen des portes, excentricité qui, cependant, existe dans toutes nos portes.

Au canal de la Marne à la Saône, par exemple, le feuillet moyen se trouve placé, en raison de la résistance propre du bordage, à environ 1/3 seulement de la hauteur des fers I, compté depuis leur face amont, et, au contraire, le poteau busqué est chanfreiné de 45 millimètres, ce qui porte le centre de la surface d'appui à 1/10 environ en aval de l'axe de ces T ; l'écartement entre le feuillet neutre et le centre des faces d'appui est donc de $1/3 + 1/10 = 13/30$ de la hauteur de ceux-ci. Or, si l'on considère une entretoise supportant une charge d'eau totale égale à P, on remarque qu'ayant $2^m,90$ de long pour une flèche du busc de $1^m,04$, elle reçoit une force de butée du vantail voisin égale à $\frac{1,45}{1,04}$P. On sait que, en appelant l sa longueur ($2^m,90$), le moment fléchissant dû à la poussée P est $\frac{Pl}{8}$; quant à la butée du vantail voisin, elle donne un moment en sens contraire égal à

$\frac{1,45}{1,04} \mathrm{P} \left(\frac{13}{30} h\right)$, h étant la hauteur des entretoises. Le rapport de ces deux moments de sens contraire est $\frac{l \times 1,04 \times 30}{8 \times 1,45 \times 13 \times h}$. En remplaçant l et h par leurs valeurs, on trouve pour cette expression :

Pour les portes d'amont	....	2,40
Id. d'aval	....	2,31

ce qui montre que le moment de flexion dû à la poussée de l'eau n'est que 2,30 à 2,40 le moment de flexion en sens contraire dû à la butée des vantaux. Grâce à ce dernier, les flèches que j'ai calculées doivent donc être réduites de $\frac{1}{2,30}$ ou $\frac{1}{2,40}$ de la valeur trouvée. Et il faut bien remarquer que, dans certaines portes, la butée se fait surtout par l'arête d'aval des poteaux busqués, de sorte que cette force de butée a son point d'appui bien plus loin oncore, que je ne l'ai supposé ci-dessus, du feuillet neutre de la porte; que, par conséquent, son mo ment fléchissant est très fortement augmenté et peut devenir supérieur à la moitié du moment fléchissant dû à la poussée de l'eau.

Il n'y a donc rien que de très naturel à ce que les formules donnent des flèches bien plus grandes que celles obtenues dans les essais ; tous ces essais ayant été faits sur des portes neuves dont les fourrures étaient encore non déformées et fortement reliées aux fers T; et je crois pouvoir ajouter qu'au fur et à mesure que ces fourrures se mâcheront ou pourriront, les flèches augmenteront parce que le centre de butée des vantaux se rapprochera du feuillet moyen de la porte.

Du reste, au moment de la pose, il peut arriver que des portes busquent presque uniquement par l'arête d'aval de leurs poteaux busqués et, dans ce cas, les nom-

bres 2,40 et 2,31, que nous avons trouvés plus haut, se transforment en 1,56 et 1,50, de sorte que la flexion est très faible; mais, au fur et à mesure que le temps de service augmente, l'arête s'émousse et pourrit et le point d'appui se rapproche du centre et, par suite, du feuillet moyen de la porte. Sa flexion, très faible au commencement, va ainsi en augmentant.

Inversement, certaines portes sont posées dans des conditions telles que le centre de butée a lieu très près du feuillet moyen, quelquefois même en amont; alors la flexion primitive est très forte, puis l'arête s'émoussant, cette flexion diminue. Dans les deux cas, elle tend vers une limite comparable à celle que nous avons admise plus haut et qui correspond au cas où le centre de butée coïncide avec le centre des faces des poteaux busqués.

J'ai calculé ce cas plus haut et on a vu qu'il correspondait à un moment de flexion en sens contraire de la poussée de l'eau qui atteint $\frac{1}{2,40}$ ou $\frac{1}{2,31}$ du moment de poussée de l'eau.

Dans ce cas, les flèches seraient celles que j'ai trouvées diminuées de $\frac{1}{2,40}$ ou $\frac{1}{2,31}$ de leur valeur. Il est assez remarquable qu'en appliquant, d'une façon générale, ce coefficient aux flèches trouvées, on se rapproche sensiblement des flèches d'expérience. Il me paraît probable qu'on s'en rapprocherait encore davantage en considérant que les portes reposent par une surface appréciable l'une sur l'autre, ce qui équivaut à un quasi encastrement sur ce bout et qu'à l'autre, celui du tourillon, l'axe de rotation forme, avec la face d'appui du montant sur le chardonnet, une autre sorte d'encastrement. Mais il ne faut compter sur aucun de ces deux cas; car, au bout d'un temps relativement court, les busqués prennent une surface un peu convexe ou, tout au moins,

se pourrissent, surtout sur les arêtes, le milieu restant bon et le collier prend un jeu suffisant pour qu'il n'y ait plus d'encastrement en ce point.

On remarque même que toutes les flèches des entretoises supérieures, dirigées en sens contraire de la pression de l'eau, ont été trouvées par expérience plus fortes que par le calcul et qu'en effet, pour ces entretoises, la butée des vantaux a pour effet d'augmenter la flèche, et doit d'ailleurs l'augmenter d'autant plus que, le busc étant appuyé, la plus grande partie des efforts de la butée doit se produire sur le haut de la porte.

Il semble, grâce à cette remarque, que la théorie concorde d'une façon satisfaisante avec la pratique.

D'ailleurs, si ces remarques sont justes, comme je le pense, on voit qu'il convient d'accorder une importance extrêmement considérable à la manière de faire buter les vantaux l'un contre l'autre, importance qui, à ma connaissance, a été indiquée explicitement pour la première fois par M. Hirsch.

J'ai d'ailleurs mis en évidence d'une façon incontestable cette importance du point de butée des portes en faisant, sur un même vantail, trois essais de flexion sous la même charge et avec cette seule différence que j'essayais d'abord la flexion dans les conditions de fermeture habituelle, et que, pour les deux autres cas, j'avais placé une règle de fer entre les arêtes d'amont des poteaux busqués et la seconde fois, les arêtes d'aval. Voici les résultats de ces essais, faits, je le répète, sur le même vantail, à une heure peut-être d'intervalle.

ENTRETOISES	FLÈCHES POUR LA BUTÉE			OBSERVATIONS
	à l'amont	ordinaire	à l'aval	
Première	0,32	0,27	0,15	1er essai.
	0,24	»	»	2e id.
Deuxième	0,42	0,39	0,12	1er essai.
	0,49	0,45	0,22	2e id.

Ces essais ont été exécutés, en été, à un moment où les biefs étaient tenus très bas ; ils ne sont pas comparables à ceux indiqués déjà dans cette note, mais l'influence du point d'appui est ainsi parfaitement démontrée; on fait changer ainsi la flèche de plus du simple au double.

En résumé donc, les formules de M. Lavoinne, et surtout celles que j'ai données qui amènent à des résultats concordant mieux avec les essais, et qui sont plus simples à calculer, en ce sens qu'elles n'exigent pas de tables spéciales, rendent un compte suffisamment exact pour la pratique courante des efforts auxquels on doit s'attendre dans les portes d'écluses et peuvent être employées en toute sécurité.

De crainte que le mode d'emploi de ces formules reste encore un peu indécis pour le lecteur, je vais reproduire les calculs que j'ai faits pour un vantail d'aval dans une écluse de $3^m,50$ de chute présentant une hauteur d'eau de $2^m,50$ sur le busc.

CHAPITRE III.

APPLICATION DES CALCULS.

L'application que je vais indiquer ici est le calcul d'une porte de $6^m,264$ de hauteur, dont le projet est à l'étude en ce moment.

Afin de ne pas lui donner un aspect trop différent des voisines, cette porte devait présenter des entretoises équidistantes de 0,260 de hauteur d'âme et un bordage d'environ 5 ou 6 millimètres d'épaisseur. Quant aux montants, au lieu de n'en mettre qu'un seul intermédiaire, j'en ai placé deux, vu que sur les portes déjà faites, on avait dû partager les panneaux inférieurs en deux par de petits montants afin de diminuer les flexions excessives trouvées d'abord.

La largeur des panneaux devient ainsi $\frac{2,9}{3} = 0,966$ dont il faut encore retrancher une largeur de semelle des T qui ne sera pas inférieure à 0,100; il restera donc 0,8663, quant à la hauteur, elle se déterminera par la condition que la tôle ne travaille qu'à 6 kilogrammes par millimètre carré.

Si, par exemple, on conserve l'espacement adopté dans les portes déjà posées, de $1^m,044$ d'axe en axe des entretoises, on trouve que pour que le bordage ne travaille qu'à 6 kilogrammes, il faut les épaisseurs suivantes :

1er panneau.	2 millimètres
2e id.	4 id.
3e id.	5 id.
4e id.	6 id.
5e id.	7 id.
6e id.	8 id.

Comme il y aura un grand nombre de portes à exécuter, je n'ai pas craint d'avoir plusieurs échantillons de tôles et j'ai adopté les épaisseurs 4, 5, 6, 7 et 8 millimètres. Le panneau du dessus travaillera à 3 kilogrammes, et tous les autres à 6 kilogrammes par millimètre carré.

L'épaisseur du bordage étant ainsi fixée, il reste à calculer les entretoises.

Pour cela, il s'agit de calculer d'abord le rapport $\frac{k}{K_1}$

des formules; pour cela, je devrais tenir compte des bordages appliqués sur les entretoises et des semelles ou convre-joints qui raidissent celles-ci; mais ne connaissant pas encore ces éléments, je calcule simplement sur le nombre des entretoises et des montants.

Ces pièces étant à peu près toutes de la même force, la rigidité totale à fléchir autour d'une verticale sera égale à sept fois la rigidité de l'une et par mètre courant de hauteur, on aura cette rigidité divisée par $6^m,264$; de même dans l'autre sens; en sorte que le moment d'inertie d'une des pièces étant I, on aura :

$$\frac{k^4}{k_1^4} = \frac{7.\mathrm{I}.2,90}{6,264.4.\mathrm{I}.},$$

d'où

$$\frac{k^4}{k_1^4} = 0,81 \quad \frac{k}{k_1} = 0,95.$$

Je calcule la valeur des moments fléchissants par unité de hauteur et au droit de chaque entretoise par la formule :

$$k^4 \frac{d^2Z}{dx^2} = \frac{4.000 = \overline{2,9}^2}{\pi^3} \left[\mathrm{H} - y - \mathrm{H} \cos\theta y \frac{\mathrm{coh.}\,\theta(\mathrm{H}-y)}{\mathrm{coh.}\,\theta\mathrm{H}}\right],$$

où :

$$\theta = \frac{\mathrm{K}}{k_1} \frac{\mathrm{H}}{a\sqrt{2}} = 0,73.$$

Voici le tableau des calculs :

VALEURS DES								
y	θy	$\cos\theta y$	$\mathrm{H}-y$	$\theta(\mathrm{H}-y)$	$\mathrm{coh.}\,\theta(\mathrm{H}-y)$	$\frac{\mathrm{H}\cos\mathrm{coh.}}{\mathrm{coh.}}$	$\mathrm{H}-y-\mathrm{H}\frac{\cos\mathrm{coh.}}{\mathrm{coh.}}$	Moments de flexion
1,044	0,760	+0,73	5,220	3,70	20,5	+1,96	3,26	3,550
2,088	1,520	+0,05	4,176	3,04	10,5	+0,07	4,10	4,450
3,132	2,28	−0,65	3,132	2,28	4,9	−0,42	3,55	3,850
4,176	3,04	−0,99	2,088	1,52	2,4	−0,31	2,40	2,610
5,220	3,70	−0,84	1,044	0,76	1,3	−0,14	1,18	1,280
6,264	4,57	−0,14	0	0	1,0	−0,11	−0,11	− 129

Il s'agit maintenant de choisir des fers de 260 de hauteur qui résistent à ces flexions avec un travail aussi vóisin que possible de 6 kilogrammes.

Les fers de 260 de haut les plus légers pèsent 40 kilogrammes, mais la plupart ont des largeurs de semelles insuffisantes pour bien river.

Le moins pesant satisfaisant à peu près à cette condition est un double T autrefois fabriqué à Maubeuge et qui pèse $40^{kg},5$ et présente les dimensions suivantes : $\frac{260 \times 100}{10}$.

Son moment de résistance en travaillant à 6 kilogrammes est de 2370; il suffit donc parfaitement et sans aucune semelle pour les trois premières entretoises à partir d'en haut; le bordage lui apportant un supplément de résistance assez considérable.

Il est également suffisant pour l'entretoise extrême qui s'appuie sur le busc; il reste donc à chercher comment on doit le renforcer pour les trois autres. On remarque que sur les quatrième et sixième entretoises, le moment résistant du fer en I est trop petit de 1480 sur la première et 1180 sur la seconde, et que sur la cinquième, il est trop faible de 2080.

En tenant compte des bordages qui se réunissent sur ces fers et des couvre-joints qui ne peuvent pas avoir moins de 5 millimètres, on trouve qu'il suffira de placer sur la semelle aval de ces entretoises des semelles de même largeur que les couvre-joints d'amont, soit 0,100, et ayant une épaisseur de 6 millimètres sur la quatrième, 10 millimètres sur la cinquième et 3 millimètres sur la sixième.

J'ai pris, pour éviter un trop grand nombre d'échantillons de fers, 5 sur la sixième entretoise et 10 sur les deux autres. Les couvre-joints sont d'ailleurs réduits à 5 millimètres ou 10, suivant les entretoises.

Dans les conditions ci-dessus les montants n'ont pas besoin d'être renforcés ; les couvre-joints, au droit de la rencontre de chaque entretoise, donnent d'ailleurs un léger renforcement.

Les montants extrêmes du tourillon et du busqué ne portent que le bordage et un couvre-joint de 5 millimètres. Ils ne présentent en aval que des couvre-joints en forme de trapèze les reliant aux entretoises.

On arrive ainsi à une porte plus légère que celles construites jusqu'à ce jour et la réduction de poids est de 50 kilogrammes pour le bordage et 520 kilogrammes pour la carcasse et, malgré cela, on peut être assuré qu'elle sera plus résistante. Cette assurance se fonde d'ailleurs, non dans les calculs dont on peut soupçonner la valeur, mais sur ce fait simple et évident que ces calculs ont conduit à renforcer les parties que l'expérience des portes actuelles avait fait reconnaître comme faibles, tout en permettant de diminuer un peu les parties qui, au contraire, avaient été reconnues trop fortes.

Les calculs conduisent donc à un résultat utile puisqu'ils amènent à construire plus solide avec moins de matière.

CHAPITRE IV.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

L'étude qu'on vient de lire traite des deux parties d'une porte de fer ; le bordage et la carcasse.

Le premier chapitre est consacré au bordage ; il contient les résultats des essais que j'ai pu faire sur des portes en service, l'essai de calcul et la comparaison entre l'expérience et le calcul. Ce chapitre montre que mes calculs suffisent pour se faire une idée assez approchée des résultats que donnera la pratique. En les admettant donc

comme bons, les calculs se feront très rapidement soit au moyen des formules, soit plutôt au moyen de tables ou du graphique joint à la présente note.

On a vu d'ailleurs qu'il convenait de se servir presque toujours des secondes formules corrigées qui donnent des résultats bien plus concordants avec l'expérience. Ces formules sont :

$$P = 32E\left(\frac{1}{\alpha^4} + \frac{1}{\beta^4}\right)\left(e^3 f + \frac{8}{27} e f^3\right),$$

et,

$$T_\alpha = \frac{4E}{\alpha^2}\left(\frac{2}{3} f^2 + e f\right).$$

Dans le second chapitre, j'ai essayé le calcul de la carcasse d'une porte et pour cela, après avoir donné des résultats d'expériences et un moyen de calcul, j'ai fait une comparaison entre ceux-là et les résultats du calcul. J'ai trouvé que le calcul donne bien une idée de la manière dont le travail se répartit dans la porte; mais qu'il attribue toujours aux diverses pièces des flexions et par suite des charges plus grandes que celles qui se produisent réellement en pratique.

J'ai montré que ce défaut du calcul de donner des flèches trop fortes doit tenir, pour la majeure partie, sinon la totalité, à ce que l'on a soin, en pratique, de faire busquer les vantaux suivant une ligne placée fortement en aval du feuillet moyen et non sur celui-ci comme je l'avais supposé dans l'établissement de mes formules; et on a vu que, moyennant cette correction qui peut, dans certains cas, réduire la flèche de moitié, le calcul concorde très suffisamment avec l'expérience.

Ces calculs se résument dans les deux formules suivantes donnant l'une la flèche, l'autre le moment de flexion par unité de hauteur en chaque point.

$$f = \frac{4\delta a^4}{\varpi^5 k^4}\left[H - y - H \cos\theta y \,\frac{\text{coh.}\,\theta(H - y)}{\text{coh.}\,\theta H}\right],$$

et,

$$\text{moment} = \frac{4\delta a^2}{\varpi^3}\left[H - y - H\frac{\cos\theta y \,\text{coh.}\theta(H-y)}{\text{coh.}\theta H}\right].$$

J'ai indiqué de quelle manière je comprenais qu'on se servît de ces calculs en les considérant comme les résultats d'une méthode de fausse position indiquant les points à renforcer, soit par un renforcement des pièces, soit par un rapprochement de celles-ci.

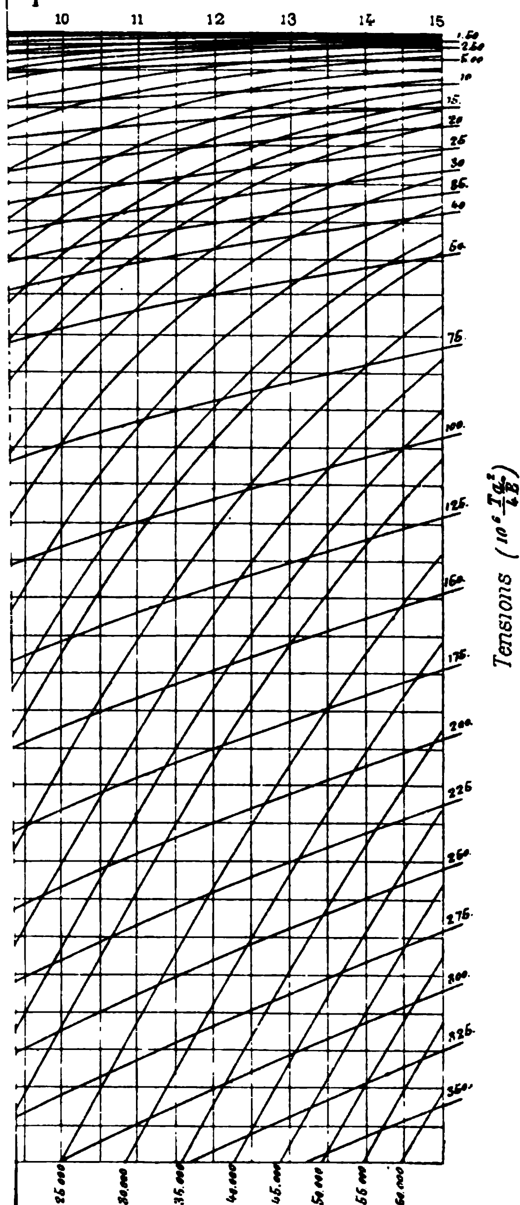
Au chapitre III, j'ai donné comme exemple de ces calculs, ceux qui sont nécessaires pour l'établissement du projet d'une porte d'écluse de $3^{m},50$ de chute.

On a vu, dans le courant de cette étude, combien sont difficiles les problèmes qui se présentent et combien peu étudiés ils ont été jusqu'à ce jour. Les solutions que j'ai indiquées ne sont que des moyens d'attente destinés à n'avoir plus aucune valeur, le jour où on aura pu résoudre exactement les problèmes rencontrés; cependant elles peuvent, aujourd'hui du moins, avoir quelque intérêt en ce qu'elles permettent des calculs assez rapides et dont les résultats ne s'éloignent pas trop de ce qui se passe en réalité, et en tous cas, lorsqu'ils en diffèrent, conduisent toujours à donner un excès de résistance.

Dijon, juillet-août 1887.

e .

f, p et T .



10
11
12
13
14
15
1.50
2.50
5.00
10
15.
20
25
30
35.
40
50.
75.
100.
125.
150.
175.
200.
225
250.
275.
300.
325.
350.
Tensions
25.000
30.000
35.000
40.000
45.000
50.000
55.000
60.000

N° 72

LE PLAN DE RUPTURE ET LA POUSSÉE DANS LES MASSIFS COHÉRENTS ET SANS COHÉSION

NOTE ADDITIONNELLE

AU MÉMOIRE INSÉRÉ DANS LES *ANNALES* DE MAI 1887

Par M. CLAVENAD, ingénieur des ponts et chaussées,
directeur des travaux de la ville de Lyon.

En coordonnant, après plusieurs années, les éléments de notre dernier Mémoire, nous avons interverti (au début de la page 596) les coefficients des poussées, horizontale et inclinée.

L'une de nos conclusions étant que ces deux poussées sont égales, on conçoit qu'elles ne soient pas modifiées dans leur ensemble.

Nous allons le montrer d'ailleurs en reprenant notre exposé auquel nous apporterons quelques considérations nouvelles.

Rappel de la détermination du plan de rupture. — La conception du plan de rupture est très ancienne. De Prony, en 1802 (paroi verticale), et Français, en 1820 (paroi inclinée, en négligeant la cohésion et le frottement entre les terres et le mur), ont établi qu'il était la bissectrice de l'angle formé par le talus naturel des terres avec le talus du massif.

Nous avons montré que cette proposition est beaucoup plus générale que ne le supposaient ces auteurs et qu'elle s'applique aux massifs cohérents comme à ceux qui sont dépourvus de cohésion.

Poussée horizontale. — Considérons une paroi verticale AC destinée à maintenir un massif à surface horizontale et cherchons la force horizontale qui empêche le glissement suivant AB.

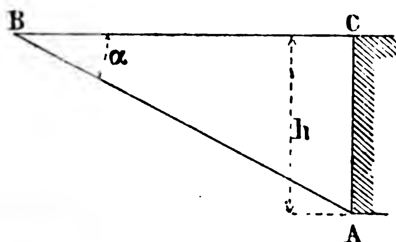


Fig. 1.

Soient (*fig.* 1) α l'angle ABC, h la hauteur du mur, π la densité des terres, f leur coefficient de frottement.

Le coefficient K′ des pressions sera donné par l'équation

$$\frac{\pi h^2}{2}\,\frac{\sin\alpha - f\cos\alpha}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\pi h^2}{2}\,K'(\cos\alpha + f\sin\alpha).$$

Cette équation donne

$$K' = \frac{\operatorname{tg}\alpha - f}{\operatorname{tg}\alpha(f\operatorname{tg}\alpha + 1)} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi)}{\operatorname{tg}\alpha}.$$

φ étant l'angle de frottement tel que $\operatorname{tg}\varphi = f$.

Le maximum de la poussée horizontale s'obtient en égalant la dérivée de K′ à 0

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\cos^2(\alpha - \varphi)} - \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi)}{\cos^2\alpha} = 0$$

d'où l'on déduit

$$\sin 2\alpha = \sin 2(\alpha - \varphi),$$

et enfin

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}.$$

Si l'on se rappelle que le plan de rupture est la bissectrice de l'angle CAB (*fig.* 2), on voit que l'angle α n'est autre que CDA et que par conséquent le prisme qui donne la poussée horizontale maxima n'est autre que le prisme de rupture. Dans ce cas, $\operatorname{tg}\alpha = f + \sqrt{1+f^2}$, et en remplaçant $\operatorname{tg}\alpha$ par cette valeur dans l'expression de K′, on obtient

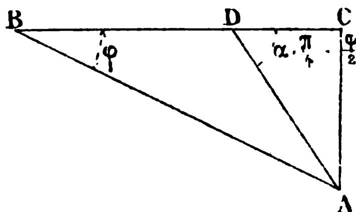


Fig. 2.

$$K' = \frac{\cos^2\varphi}{(1+\sin\varphi)^2} = \frac{1}{(f+\sqrt{1+f^2})^2} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).$$

C'est précisément l'expression de Rankine.

Ainsi *la poussée horizontale maxima est celle qui résulte du glissement du prisme de rupture, et son coefficient n'est autre que celui de Rankine.*

Introduction du frottement. — Poussée inclinée. — Supposons comme on l'admet d'ordinaire que le frottement à la paroi soit égal au frottement des terres sur elles-mêmes.

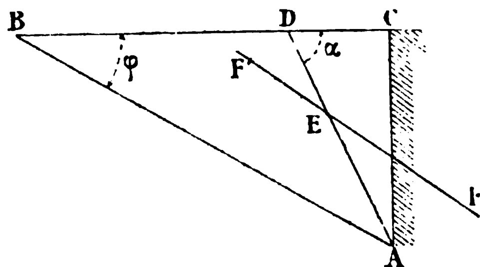


Fig. 3.

Soient AD le plan de rupture, φ l'angle du talus naturel des terres.

S'il y a frottement la poussée sera dirigée suivant FEF′ parallèle à AB, de sorte que l'angle α étant $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$, puisque AD est la bissectrice de CAB, l'angle

DEF′ sera égal à CAD et à $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ complémentaire de $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$.

L'action de glissement du prisme CDA sur AD sera toujours

$$\frac{\pi h^2}{2} \frac{\sin\alpha - f\cos\alpha}{\operatorname{tg}\alpha}.$$

Et la résistance suivant la direction FEF′

$$\frac{\pi h^2}{2} K'(\sin\alpha + f\cos\alpha),$$

d'où

$$K' = \frac{\operatorname{tg}\alpha - f}{\operatorname{tg}\alpha(\operatorname{tg}\alpha + f)}.$$

En y remplaçant $\operatorname{tg}\alpha$ par $f + \sqrt{2 + f^2}$, nous retombons sur la formule de Boussinesq, qui est

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left[\varphi - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right]},$$

ou sur la formule équivalente $\frac{\cos\varphi}{(1 + \sin\varphi)(1 + 2\sin\varphi)}$, ainsi que nous l'avons démontré dans notre Mémoire de mai 1887 (*) à la page 597.

En conséquence, la poussée inclinée suivant la direction du talus naturel et qui résulte de la tendance au glissement du prisme de rupture est égale en valeur absolue à la poussée calculée par M. Boussinesq dans l'hypothèse d'un frottement à la paroi et son coefficient est donné par la formule de cet auteur ou par notre formule équivalente

$$\frac{\cos\varphi}{(1 \sin\varphi)(1 + 2\sin\varphi)}.$$

(*) Dans la *fig.* 2 du susdit Mémoire, les angles désignés par α devraient l'être par a; ils n'ont aucun rapport avec l'angle α que nous employons dans ces formules.

Interprétation de ces résultats. — La poussée ne change pas en valeur absolue, sa direction seule change. — On voit donc que les poussées peuvent être calculées comme si elles résultaient uniquement du mouvement du prisme de rupture.

Comparons les valeurs respectives de la poussée horizontale et de la poussée inclinée, et, pour les matériaux les plus communs, nous trouverons qu'elles sont très rapprochées, comme le montre le tableau suivant :

	Pierres cassées		Gros sable	Sable fin	Terre	Argiles	
$f = \text{tg}\,\varphi =$	1	$\frac{1}{12}$	0,795	0,74	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
K { Rankine.	0,1715	0,2195	0,2328	0,2540	0,2867	0,5198	0,6720
K { Boussinesq	0,1715	0,2055	0,2149	0,2408	0,2539	0,4418	0,5888
K { Formule $\frac{1}{(1+\sqrt{2})^2 f}$.	0,171	0,206	0,215	0,231	0,257	0,515	0,857

La formule plus commode $\frac{1}{(1+\sqrt{2})^2 f}$ donne également des résultats qui concordent avec les précédents.

Nous pourrons nous en servir pour évaluer, soit la poussée horizontale, soit la poussée inclinée qui sont égales, ainsi qu'il résulte de la thèse que nous avons soutenue dans notre Mémoire.

Essayons d'abord d'en donner une raison mathématique.

Supposons en premier lieu qu'il n'y ait pas frottement.

Les pressions seront normales et représentées par le triangle ACP par exemple.

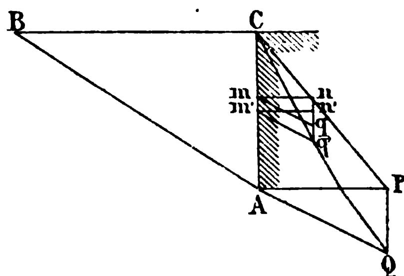


Fig. 4.

Si, par suite d'un mouvement, le frottement se produit, les pressions nor-

males continueront à s'exercer; l'une d'elles mn donnera un frottement nq; la résultante sera mq et la poussée totale dirigée cette fois suivant des parallèles à mq et à AQ sera donnée par le triangle ACQ, lequel est de même superficie que ACP.

Le frottement, en supposant qu'il ne modifie pas la répartition des pressions suivant la loi hydrostatique, ne fait donc que changer la direction de la poussée sans modifier sa valeur absolue.

Nous trouvons une vérification frappante de cette conception dans l'expérience de la boite à sable citée par M. Flamant.

M. Flamant dit dans les *Annales* de juin 1882 :

« Tout le monde a pu remarquer qu'une caisse de bois vide d'une largeur un peu plus grande que sa hauteur et d'une longueur quelconque, posée sur le sol de manière que son arête antérieure y soit maintenue par un petit obstacle qui l'empêche de glisser, sans l'empêcher de pivoter autour d'elle, peut parfaitement supporter la poussée d'un tas de sable que l'on appuie contre la paroi opposée. »

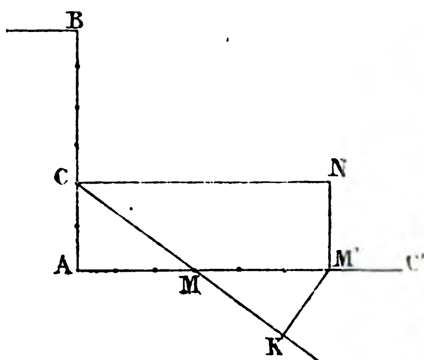


Fig. 5.

Expliquons ce fait : AB et AC' sont les deux parois de la caisse soutenant un massif sableux dont le talus naturel est de 2/3.

La poussée s'exerçant en C au tiers de AB, on conçoit que si elle est horizontale elle ne peut que faire basculer la caisse autour de son arête antérieure, puisque le glissement est empêché.

Si la poussée était d'une manière absolue dirigée suivant CM (talus naturel dans le cas de frottement), il suffirait que la largeur de la caisse fût un peu plus grande que AM pour qu'elle ne basculât pas. Or l'expérience montre qu'elle basculerait.

On ne peut donc pas dire que la poussée est dirigée suivant CM, on ne peut pas dire non plus qu'elle est horizontale, car la caisse basculerait pour une largeur bien supérieure à la hauteur.

Il y a concomitance de deux pressions, l'une horizontale, l'autre dirigée suivant CM : ces deux pressions sont égales.

Aux premiers moments, la caisse sous l'action de la poussée horizontale tend à basculer autour de son arête antérieure ; il en résulte un frottement et la poussée CM prend naissance.

Ces effets sont simultanés et, pour qu'il y ait équilibre, il faut que les moments de ces deux poussées par rapport à l'arête antérieure soient égaux et par conséquent que leurs bras de levier soient les mêmes, puisqu'elles sont égales.

Remarquons que $AM = \frac{3}{8} CA$, portons $MM' = AM$, nous aurons $AM' = AB$.

Les deux bras de levier M'N, M'K ne sont pas égaux si la caisse est de même largeur que sa hauteur, mais il suffit qu'elle soit d'une largeur un peu plus grande que sa hauteur pour qu'ils le deviennent.

De ces faits et de ceux que nous avons étudiés dans notre précédent Mémoire, nous dégageons donc les deux propositions suivantes :

1re *proposition.* — *Dans les massifs pulvérulents, la poussée sur la paroi résulte de la concomitance de deux poussées, l'une horizontale qui tend à produire la rotation autour de l'arête antérieure, l'autre dirigée suivant*

le talus naturel qui résulte comme la première du glissement du prisme de rupture.

Cette concomitance est effective dans l'équilibre instable, c'est-à-dire que le moment de ces deux forces est le même par rapport à l'arête antérieure.

Pendant le mouvement si peu étendu qu'il soit, la poussée tout en conservant sa grandeur absolue change de direction depuis l'horizontale jusqu'à la direction du talus naturel.

2e *proposition. — Dans les massifs cohérents, ces deux poussées sont définies de la même façon, ainsi que le plan de rupture; seulement elles ne sont pas concomitantes, mais successives.*

La rupture s'opère d'abord par traction sous l'influence d'une réaction horizontale, puis par cisaillement suivant le plan de rupture.

Lyon, le 26 juillet 1887.

CHRONIQUE

(Décembre 1887)

N° 73

Note sur le tracé des paraboles des moments fléchissants.

Par M. Maurice D'OCAGNE, ingénieur des ponts et chaussées.

Je viens seulement de prendre connaissance de la note publiée dans la livraison de septembre 1887 des *Annales*, au sujet du tracé des paraboles de moments fléchissants, par M. Bosramier. J'ai pour ma part déjà utilisé le théorème que signale M. Bosramier (*), et qui est, en effet, d'un emploi fort commode dans la pratique.

Les paraboles des moments fléchissants étant définies par trois de leurs points et la direction de leur axe, le théorème en question permet, comme l'a fait voir M. Bosramier, de déterminer les tangentes en deux de ces points. On est alors amené à tracer une parabole connaissant deux de ses points a et b et les tangentes aq et bq en ces points (*fig.* 1). Ce sont d'ailleurs les conditions qui permettent le tracé le plus expéditif de la parabole.

Après l'expérience que j'en ai fait faire dans mes bureaux, je crois qu'un procédé très rapide et très avantageux pour résoudre ce second problème est celui que j'ai fait connaître en détail dans le *Génie Civil* (1886, 2e semestre, p. 90 et 334) et que je vais succinctement rappeler ici. Je n'attache d'ailleurs à la question aucune espèce d'amour-propre d'auteur, attendu qu'elle appartient au domaine le plus élémentaire et n'a pas d'importance au point de vue scientifique. Si j'y reviens, c'est qu'il me semble que le procédé présente, au point de vue pratique, de réels avantages, et qu'il peut être utile aux personnes appelées à dresser des épures de résistance.

(*) J'ai énoncé ce théorème, sous forme d'exercice, dans la livraison de juin 1887 du *Journal de mathématiques spéciales* (Question 225). La démonstration analytique de M. Bosramier est la plus simple qu'on en puisse donner.

Ayant découpé dans une feuille de carton mince ou de papier un peu fort un trapèze $\beta\beta'\gamma\gamma'$ tel que $\beta\gamma$ soit égal à ad (d étant le milieu de ab) et que, lorsque $\beta\gamma$ est appliqué sur ad, $\gamma\gamma'$ se con-

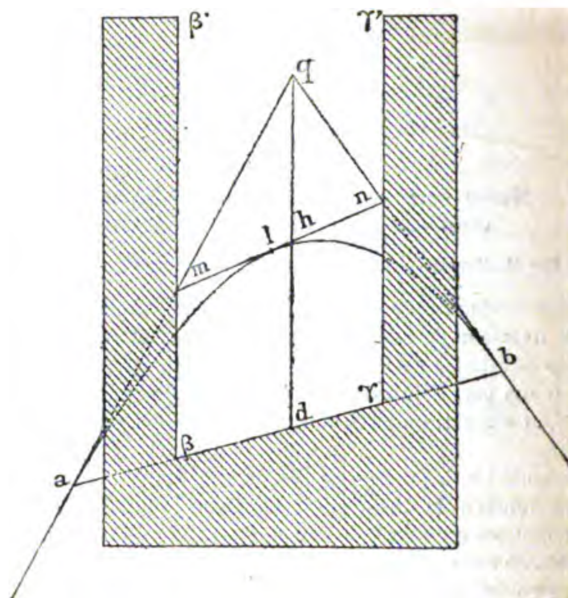


Fig. 1.

fonde avec dq, on a le moyen d'obtenir, *en aussi grand nombre qu'on veut* sans qu'il en coûte plus de peine, des tangentes à la parabole qu'on se propose de tracer, avec leur point de contact.

En effet, si pour une position quelconque du gabarit, le côté $\beta\gamma$ étant placé sur la droite ab, les côtés $\beta\beta'$ et $\gamma\gamma'$ coupent aq et bq aux points m et n, la droite mn est tangente à la parabole et son point de contact est le point l tel que $ml = hn$ (*).

Par ce moyen, on a vite fait d'obtenir assez de tangentes avec leur point de contact pour que le tracé de la parabole s'en déduise sans hésitation.

C'est à ce qui précède que se borne le procédé auquel j'ai fait allusion. Il suffit de le mettre à l'essai pour s'apercevoir de sa simplicité.

(*) Pour toutes les démonstrations je renvoie à mes articles du *Génie civil.*

A titre de complément, j'indiquerai aussi la construction du foyer donnée dans mon article du *Génie Civil*, et précédemment dans les *Nouvelles Annales de mathématiques* (3e série, t. III, 1884, p. 28).

La perpendiculaire élevée en *a* à *aq* (*fig.* 2) coupant au point *h*

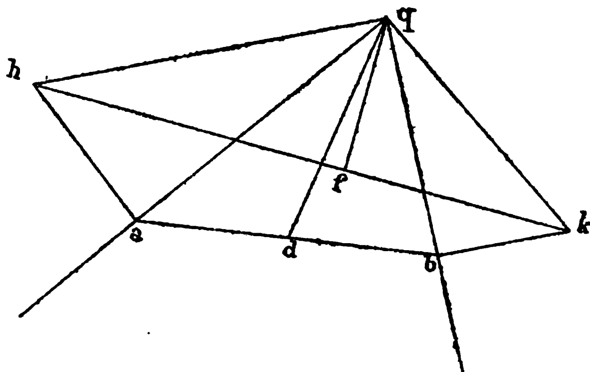


Fig. 2.

la perpendiculaire élevée en *q* à *bq*, et la perpendiculaire élevée en *b* à *bq* coupant au point *k* la perpendiculaire élevée en *q* à *aq*, le foyer *f* est le pied de la perpendiculaire abaissée de *q* sur *hk*.

La parallèle menée à *qd* par le foyer *f* donne l'axe de la parabole.

Comme vérification, la tangente au sommet doit se confondre avec la droite qui joint les pieds des perpendiculaires abaissées de *f* sur *aq* et sur *bq*.

Rochefort, 12 décembre 1807.

Des causes d'usure des pierres et des moyens proposés pour y remédier.

Un grand nombre de pierres naturelles, employées comme matériaux de construction, résistent mal aux influences atmosphériques et s'usent ou se détériorent assez rapidement. On peut dire qu'en France, c'est le cas presque général pour la plupart des roches sédimentaires. Leur constitution, toujours plus ou moins poreuse, les prédispose à ressentir d'une manière tout particulièrement fâcheuse les effets du froid et de l'humidité. Que ces pierres soient naturellement gélives, ou que l'action de

la gelée se fasse sentir d'une manière plus lente, la détérioration des constructions ne se produit pas moins d'une manière certaine. Seules, les pierres où la silice domine résistent en général à cette influence. Ce sont aussi les plus dures, les moins poreuses, les moins susceptibles de s'attaquer chimiquement.

Il n'est donc pas étonnant que les premiers essais tentés pour rendre les pierres d'origine sédimentaire moins aptes à se désagréger sous l'influence combinée de l'eau et du froid, aient eu pour objet de leur incorporer une certaine quantité de silice. Quand M. Kulhmann eut découvert le moyen de préparer industriellement les silicates alcalins, on songea de suite à les employer au durcissement des matériaux de construction. On pensait que le silicate introduit à l'état liquide dans l'intérieur des pierres se décomposerait au contact de la chaux en donnant un dépôt de silice qui viendrait envelopper chaque molécule de pierre et la rendrait ainsi plus dure. Cet effet se produit bien en réalité, mais les alcalis mis en liberté salinifient la pierre, la tachent et lui donnent une tendance à se salpêtrer et par conséquent à se charger d'humidité. La surface extérieure de la pierre devient bien dure et quelquefois imperméable. Mais si la partie postérieure est tant soit peu humide au moment où survient une gelée sérieuse, l'eau emprisonnée par la couche extérieure ne pouvant se dilater librement, fait éclater cette couche et au bout de peu de temps l'opération est à recommencer.

Le barytage ne donne pas de résultats plus satisfaisants; il consiste à imprégner les pierres d'une solution de baryte caustique qui bouche les pores de la pierre en se transformant en carbonate. Outre que la baryte est peu soluble en même temps que vénéneuse, elle produit, au point de vue de la gelée, les mêmes effets que la silicatisation.

Dans ces dernières années, MM. Faure et Kessler, de Clermont-Ferrand, ont proposé une solution nouvelle qui paraît donner de meilleurs résultats; elle est basée sur l'emploi des fluosilicates (ou fluates) solubles et a reçu de leurs inventeurs le nom de *fluatation*.

Les fluosilicates, $Si^2Fl^9M^3$ (M étant le métal) sont presque tous solubles dans l'eau. Seuls, ceux des métaux alcalins sont à peu près insolubles. Mis en présence du carbonate de chaux, ils donnent naissance par double décomposition à du fluorure de calcium, à de la silice et à l'oxyde du métal accompagné d'un dégagement d'acide carbonique. Quand cet oxyde est fixe, la réaction ne va pas plus loin. C'est ce qui se passe pour le zinc,

le fer, le chrome, le cuivre, l'aluminium. Avec le fluate de magnésie, il se produit une carbonatation subséquente.

Si l'on imprègne une pierre calcaire d'un fluate, la décomposition précitée s'opère dans l'intérieur même de la pierre, avec fixation des éléments fluorure, silice et oxyde. Mais le dégagement d'acide carbonique qui accompagne la réaction empêche que l'imperméabilisation s'effectue en bouchant tous les pores; par conséquent il reste des canaux ouverts par lesquels l'humidité intérieure pourra s'échapper sous l'influence de la chaleur ou de la gelée. Les effets de cette dernière ne seront plus les mêmes que dans le cas de la silicatisation ou du barytage; ils s'atténuent presque complètement en même temps que disparaissent une grande partie des autres causes de destruction.

L'application des fluates se fait très simplement, en imprégnant la pierre du liquide durcissant au degré de concentration voulu, avec une éponge, un pinceau ou une pompe. Ces substances ne sont ni caustiques ni corrosives ni vénéneuses.

Quand il s'agit de pierres tendres, leur résistance augmente sensiblement en même temps que leur porosité se réduit dans de très larges proportions. C'est ce qui paraît résulter des expériences de M. le professeur Totmayer (*Journal de Schweizerische Bauzeitung*) et de celles que M. Jean Haneuschild a faites pour l'association des tuiliers et chaufourniers de Berlin.

Il faut toutefois remarquer qu'il s'agit ici seulement d'expériences de laboratoire. Il est fort probable que, quand on a fait les premiers essais de silicatisation, on a eu aussi des résultats analogues qu'une expérience pratique plus prolongée est venue infirmer.

Pour pouvoir se prononcer sur l'efficacité réelle de la fluatation, il faut donc aussi attendre les résultats de l'expérience du temps, en ce qui regarde les pierres exposées aux agents atmosphériques.

Pour celles qui sont employées à l'intérieur, il est incontestable que leur porosité et leur dureté subissent des changements importants. C'est ainsi qu'on a pu polir, après fluatation, des calcaires tendres, et se servir pour des effets décoratifs des teintes des oxydes métalliques qui se déposent dans les matériaux fluatés.

Quel que soit l'avenir qui soit réservé à la fluatation, les principes sur lesquels reposent cette opération sont sérieux et méritent de fixer l'attention. C'est à ce titre que nous avons cru devoir la signaler aux ingénieurs.

ERRATUM

Dans la note de la page 469 du mémoire sur la fabrication des chaux hydrauliques, inséré dans le numéro des *Annales* d'octobre 1887, le chiffre de 865 millièmes, donné pour le volume de pâte rapporté au volume de chaux en poudre, s'applique à la *chaux tassée*, et non à la chaux non tassée, comme cela est dit par erreur. Il en résulte que les chiffres suivants doivent *être* augmentés.

De nouvelles expériences en préparation indiqueront les chiffres définitifs; ceux du dosage des mortiers ne changeront pas sensiblement, si l'on tient compte de la petite quantité d'eau à ajouter pour faciliter le gâchage.

GOBIN.

TABLES

DES MÉMOIRES ET DOCUMENTS

PUBLIÉS

DURANT LE DEUXIÈME SEMESTRE DE 1887

PREMIÈRE TABLE

RÉCAPITULATION DES ARTICLES PAR ORDRE D'INSERTION

DEUXIÈME TABLE

ANALYSE DES MATIÈRES PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE

FIN DES TABLES DES MÉMOIRES DU 2[e] SEMESTRE DE 1887.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

8

R.

Siphon

5.025

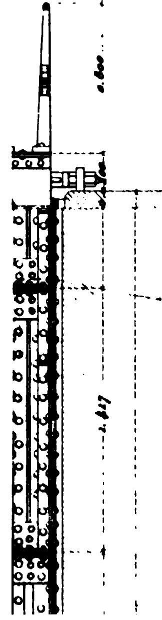
1.675

5.50

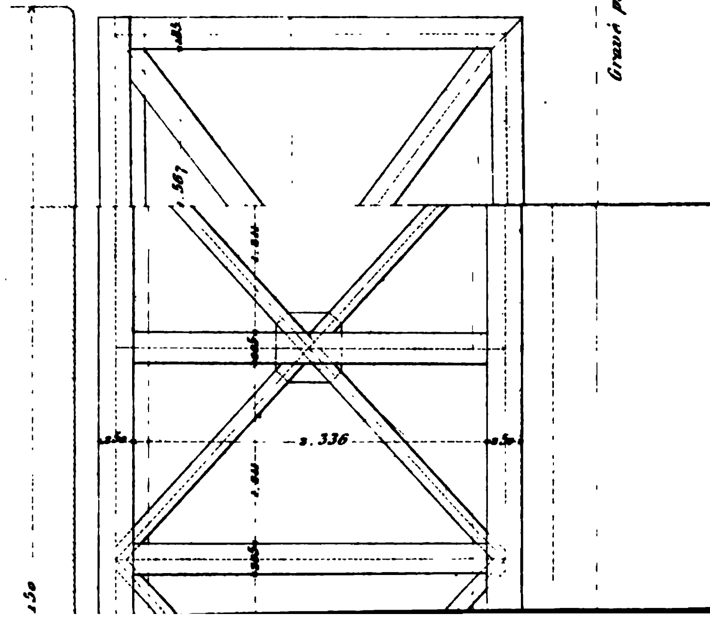
Gravé par Maqu…

…cluses.

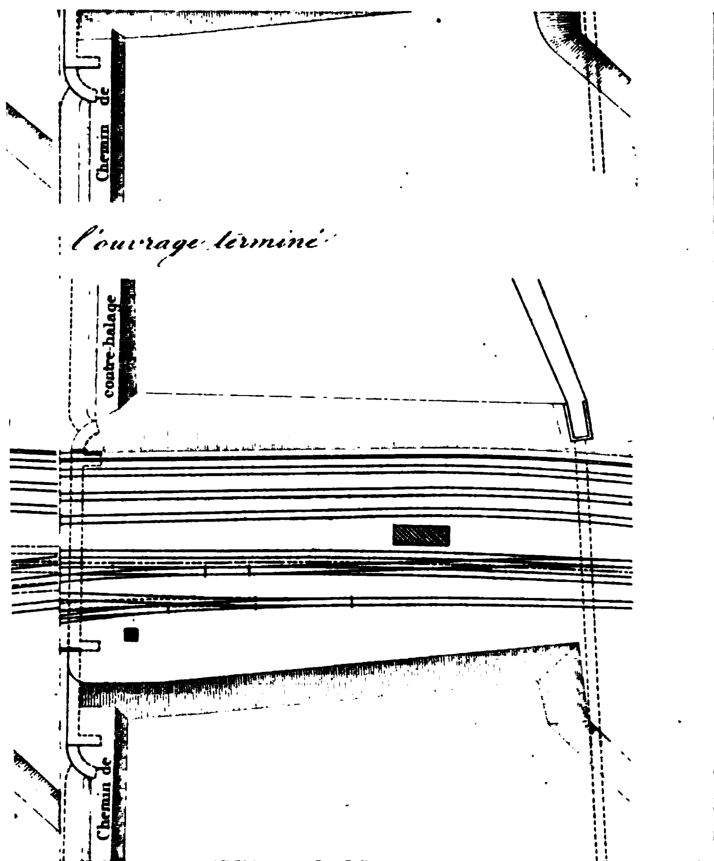
…ransversale sur IJ.



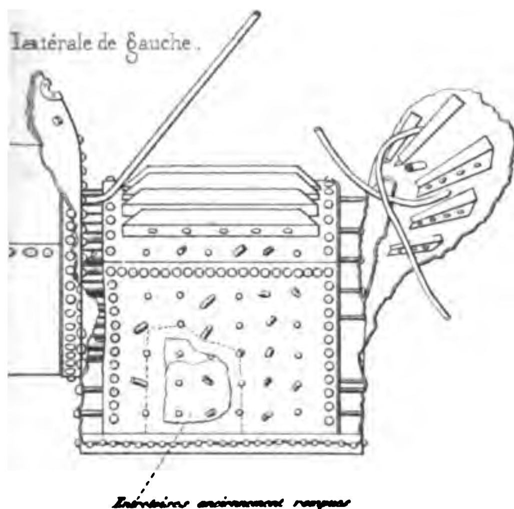
(B) Fig. 5. Épure d'une porte d'amont de l'écluse N° 1.



Gravé par Macquet



Gravé par Macquet



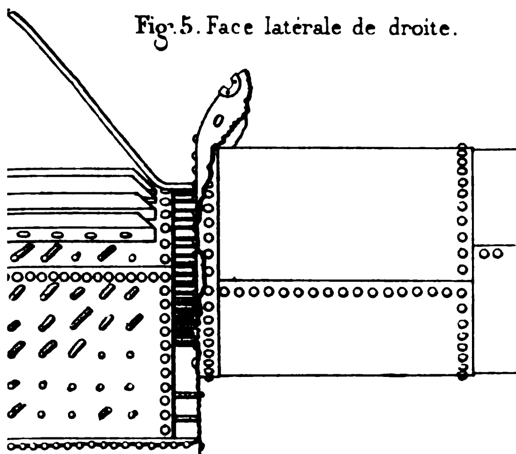


Fig. 5. Face latérale de droite.

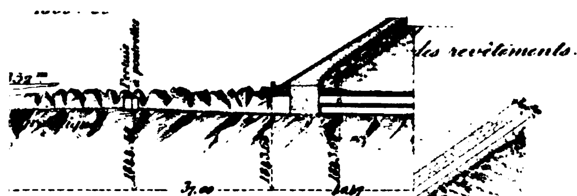
0.025 par mètre (Fig 3. 4. 5. et 6.)

1 2 3 mètres

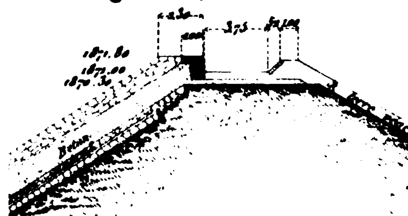
lle de 0.02 par mètre (Fig 1 et 2.)

2 3 4 mètres

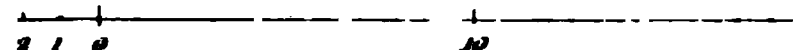
Macquet sc.



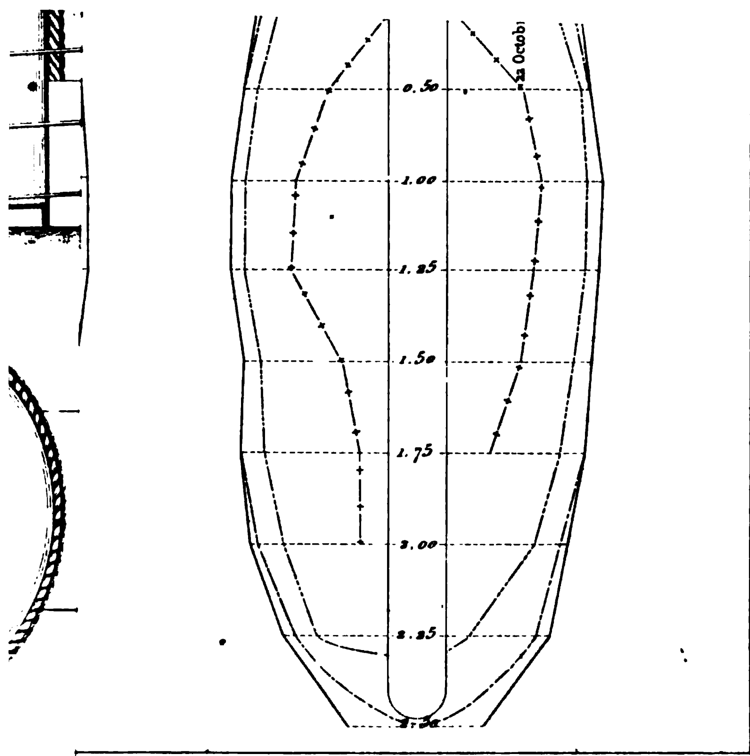
B Fig. 3. Coupe en travers.



B Echelle de 0.m0025 par mètre.

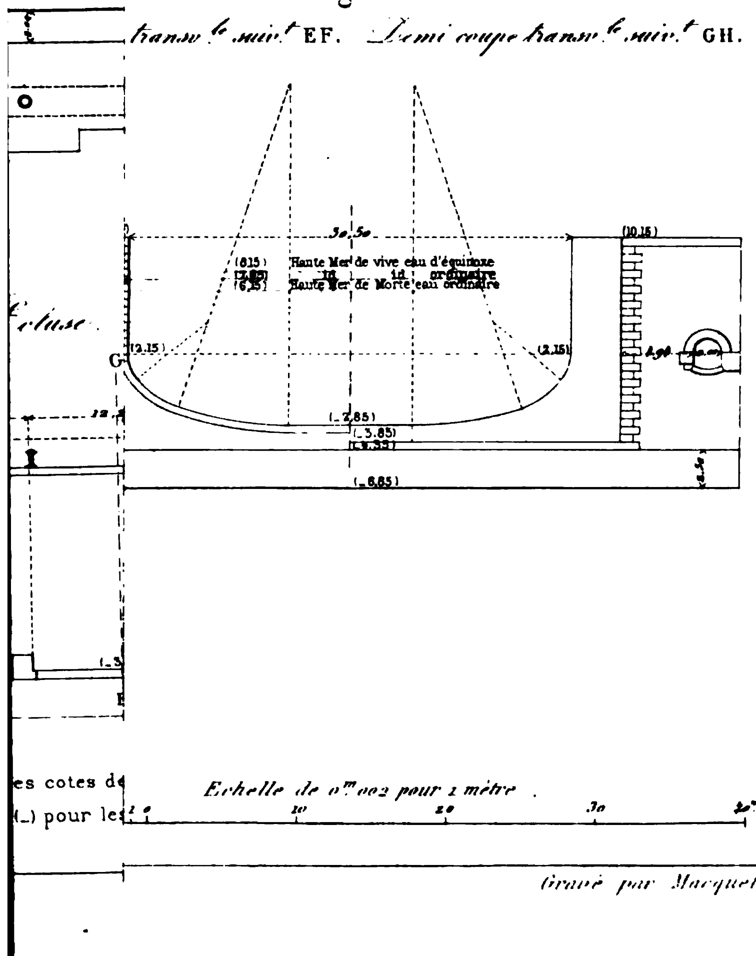


Gravé par Macquet



Gravé par Marquet

Fig. 4.


transv.le suiv.t EF. Demi coupe transv.le suiv.t GH.
30,50
(10.15)
(8.15) Haute Mer de vive eau d'équinoxe
(7.85) id id ordinaire
(6.15) Haute Mer de Morte eau ordinaire
Écluse.
(2.15)
(2.15)
G
(_2.85)
(_3.85)
(_6.85)
es cotes de
(_) pour les
Echelle de 0m 002 pour 1 mètre.
10
20
30
Gravé par Marquet

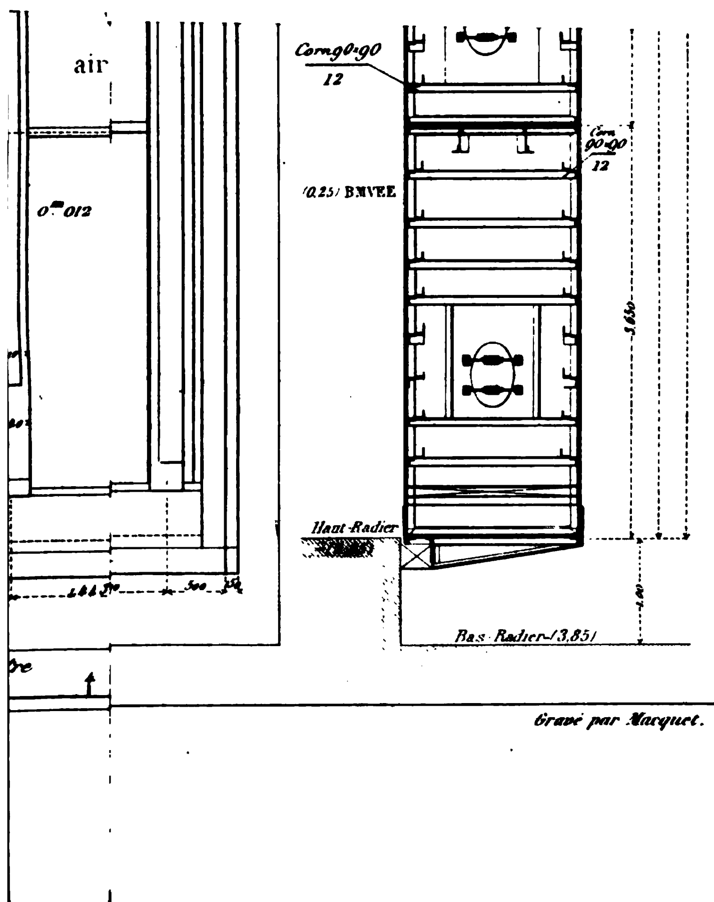
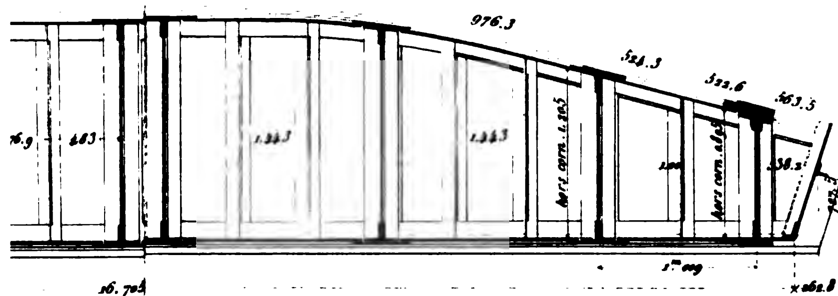
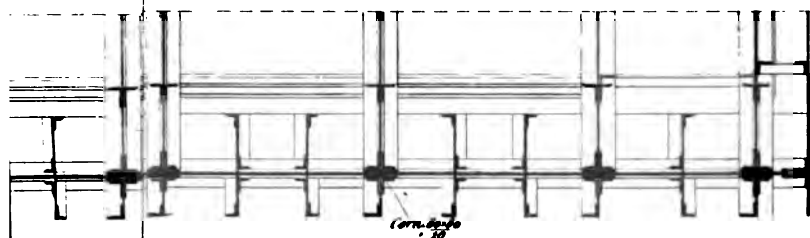

air
0m 012
Corn 90×90 / 12
Corn 90×90 / 12
(0.25) BMVEE
3.650
Haut Radier
Bas Radier (3.85)
500
Grave par Marquet.

Fig. 3. *S*



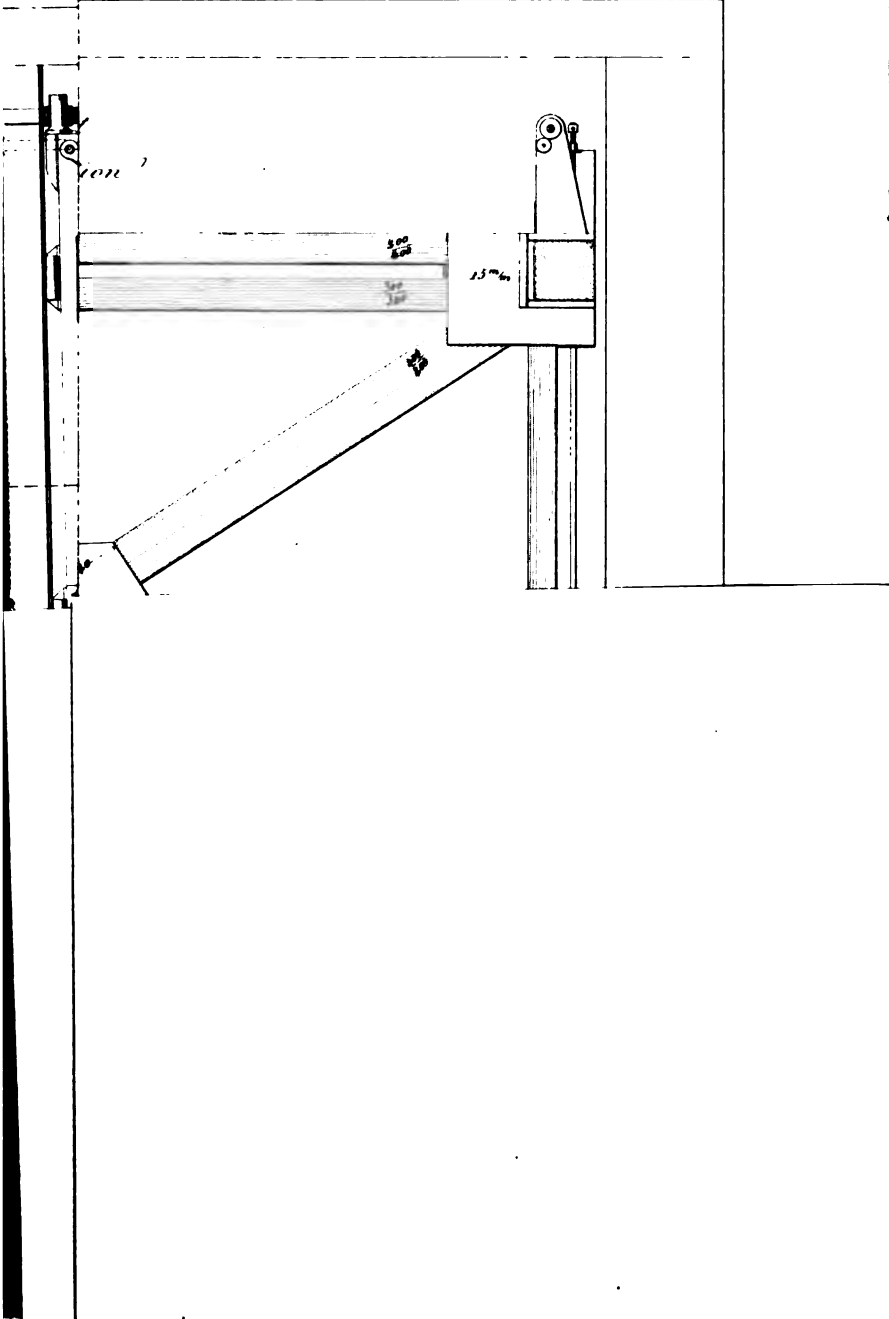
...dinale s...





Echelle de 0m 020 pour 1 mètre.

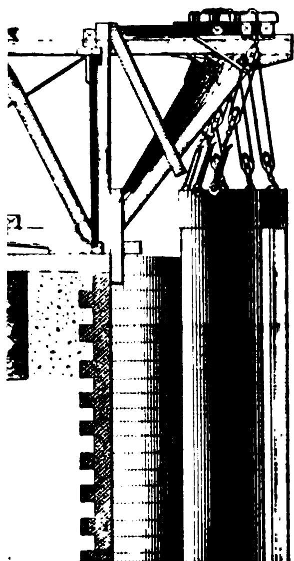
Gravé par Macquet

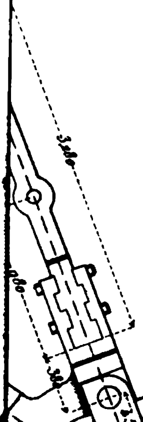

ion
15 m/m

aux caps

...on

... des ancrages



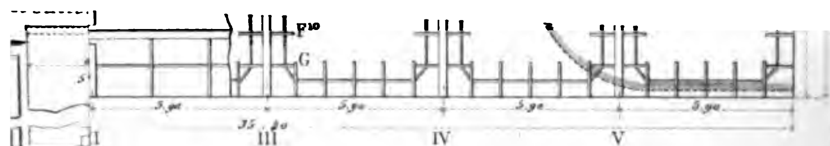




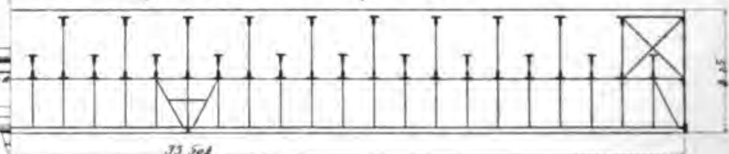
(1,57)
BASSIN DUQUESNE
BASSIN BÉRIGNY
(1,57)
à Paris par Pontoise
de Fer de Dieppe à Paris
Rouen
I E P P E
Route Na
ute Nle No 15 de Dieppe à Paris

0001 pour 1m00
000m

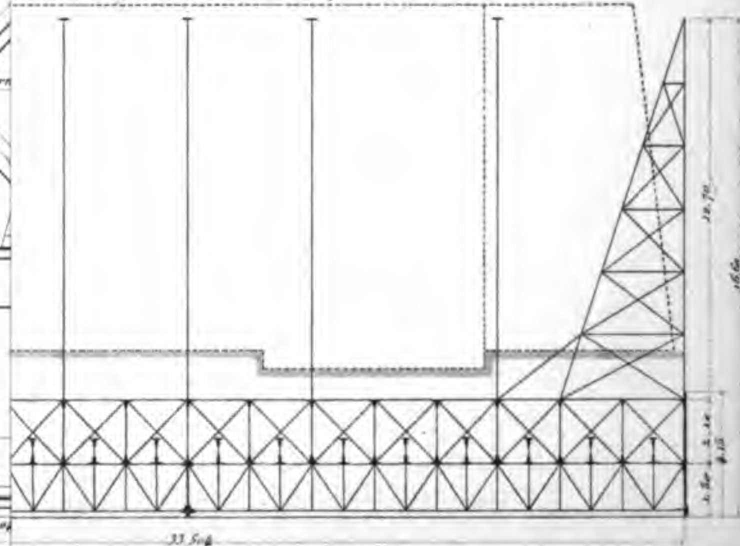
Gravé par Macquet.



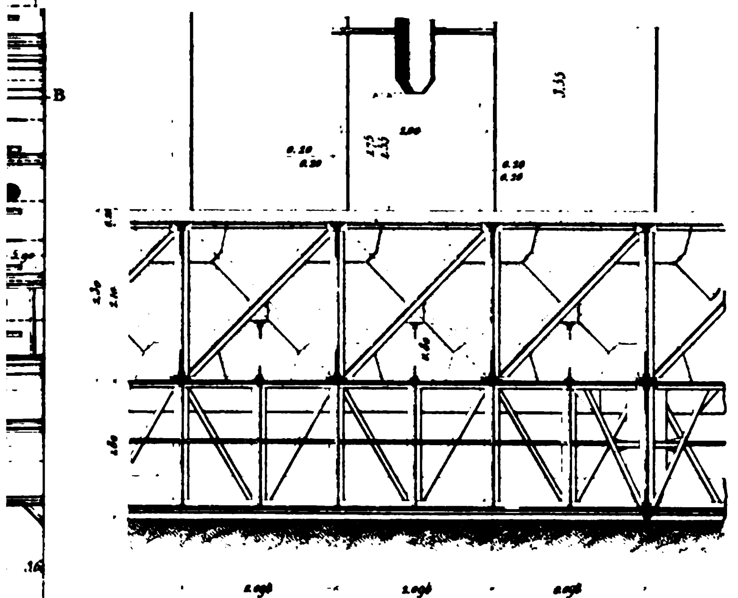
Poutre longitudinale _ Coupe MN.



Poutre longitudinale _ Coupe IV_IV.



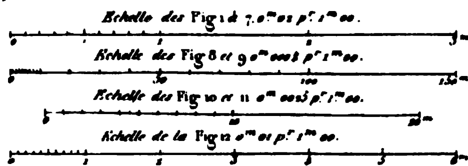
Gravé par Macquet



Hautes mers d'équinoxe

Niveau ordinaire des eaux de la Retenue à hte mer

d° à basse mer



Gravé par Macquet

enlevée

fonçage)

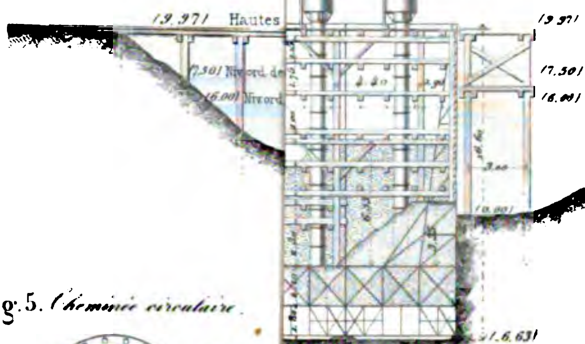
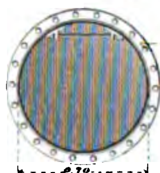


Fig. 5. Cheminée circulaire.



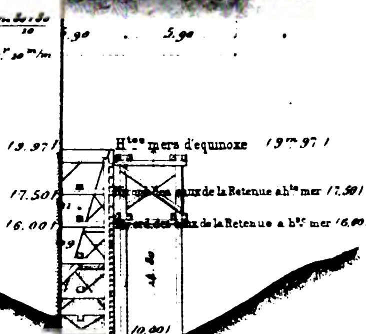
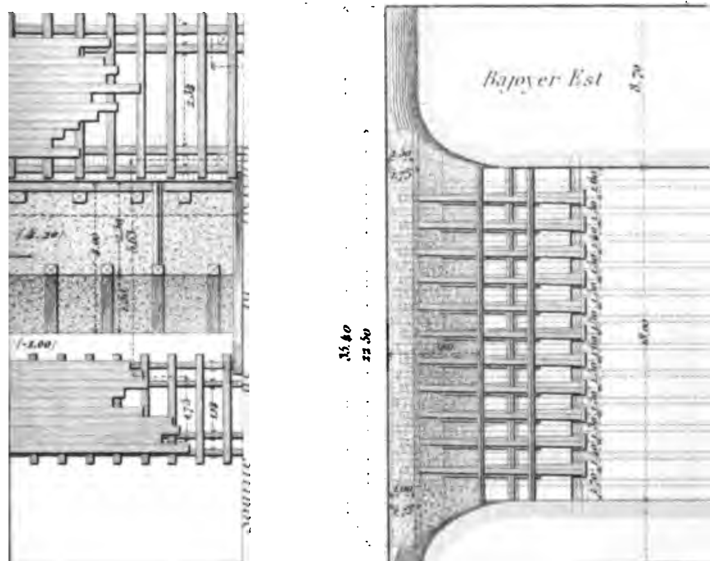


Fig. 6. Cheminée elliptique



... en tête de l'Éclu... Batardeau en tête de l'Écluse.

Fig. 7. : *Plan*



'LUSE D'AVAL DU' 1887. Pl 47

'CDEF

